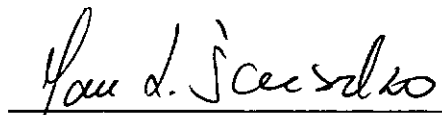


ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM MANCAL DE FOLHA

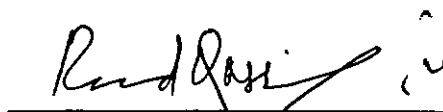
Sergio Exel Gonçalves

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE  
PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PAR  
TE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS ( M.SC. )

Aprovada por:

  
\_\_\_\_\_  
Jan Leon Scieszko  
(Presidente )

  
\_\_\_\_\_  
Luiz Bevilacqua

  
\_\_\_\_\_  
Raad Y. Qassim

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 1979

GONÇALVES, SERGIO EXEL

Estudo Experimental de um Mancal de Folha [ Rio de Janeiro ] 1979.

VIII, 79p. 29,7cm (COPPE-UFRJ, M.Sc., Engenharia Mecânica, 1979)

Tese - Univ. Fed. Rio de Janeiro. Fac. Engenharia

1. Estudo experimental de um mancal radial aerostático de folha. I. COPPE/UFRJ II. Título(série).



Agradeço a todos aqueles que, das mais variadas formas, contribuíram para a realização deste trabalho e especialmente:

Ao Professor Jan Leon Scieszko pelo incentivo e orientação segura,

Aos colegas do Laboratório de Dinâmica das Máquinas, e

Aos amigos cujo incentivo e apoio sempre me acompanharam durante a realização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho é um estudo experimental de um mancal aerostático radial de folha.

Um eixo vertical é suportado axialmente por um mancal de escora lubrificado a ar e radialmente por dois mancais de folha, constituído cada um por 3 segmentos que envolvem o eixo e tracionados por tirantes. Nas superfícies de contato é injetado ar sob pressão através das folhas de modo a se obter a separação. A separação é medida em função da pressão do ar injetado e da tração nos tirantes.

Os testes de funcionamento mostraram um comportamento estável entre 2000 e 16200 rpm e ausência total de contato entre as folhas e o eixo a partir de 9300 rpm. Foram feitas medidas da rigidez do mancal constatando-se que esta é bem menor do que a rigidez do filme de ar.

Foi feito um cálculo teórico simples dos principais parâmetros do mancal utilizando a teoria convencional para mancais de sapata rígida, obtendo-se boa aproximação com os resultados experimentais.

## ABSTRACT

This work is an experimental study of an aerostatic radial foil bearing.

A vertical shaft is supported axially by an air lubricated thrust bearing and radially by two foil bearings, each one made up of 3 segments of foils around the shaft, and tensioned by pulling rods. Compressed air is injected between the contact surfaces to obtain separation. Separation is measured as a function of the injected air pressure and the tension at the foils.

The operation tests showed a stable performance from 2000 to 16200 rpm and total absense of contact between the foils and the shaft over 9300 rpm. Measurements of the stifness of the bearings showed values much lower than the stifness of the film of lubricant.

A simple theorectical calculation of the main parameters of the bearing was made based on the conventional theory for rigid pads aerostatic bearings, showing good aproximation of experimental results.

## INDICE

	Página
I INTRODUÇÃO .....	1
II DESCRIÇÃO DO MANCAL DE FOLHA .....	5
III EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL .....	9
IV EXECUÇÃO DOS MANCAIS DE FOLHA E DO EIXO	
4.1 - Execução dos Mancais de Folha .....	13
4.2 - Execução do Eixo .....	19
4.2.1 - Lapidação da Face Plana Inferior.....	22
4.2.2 - Lapidação dos Munhões dos Mancais	
Radiais.....	23
V SISTEMA DE MEDIDAS.....	24
5.1 - Medida da Velocidade .....	26
5.2 - Detecção de Contato entre o Eixo e	
os Mancais .....	26
5.3 - Medida da Separação entre as Folhas e o	
Munhão .....	28
5.4 - Medida da Pressão de Alimentação dos	
Mancais .....	35
5.5 - Medida da Tensão nos Tirantes .....	37
5.6 - Medida da Rigidez do Mancal.....	37
VI DESCRIÇÃO DOS TESTES	
6.1 - Funcionamento .....	40
6.2 - Separação entre as Folhas e o Munhão .....	43
6.3 - Contato entre as Folhas e os Munhões .....	44

6.4 - Rigidez do Mancal.....	51
VII CÁLCULO TEÓRICO DA SEPARAÇÃO .....	56
7.1 - Hipóteses adotadas .....	57
7.2 - Relação entre a Distribuição de Pressões e a tração nos tirantes .....	60
7.3 - Fluxo do gás .....	62
7.4 - Expressão da Separação em função de $P_0$ , $P_a$ e $T$ .....	65
VIII ANÁLISE DOS RESULTADOS	
8.1 - Funcionamento .....	69
8.2 - Separação .....	70
8.3 - Rigidez .....	72
IX CONCLUSÕES .....	75
X BIBLIOGRAFIA .....	77



## CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

O emprego de rotores de alta velocidade tem-se desenvolvido bastante em anos recentes. Exemplos disso são as aplicações em separação de isótopos por centrifugação ou em volantes para acumulação de energia. Para o desenvolvimento destas aplicações torna-se necessário um aperfeiçoamento dos mancais utilizados e a busca de soluções adequadas para a sustentação de rotores em altas velocidades.

Entre as soluções que se têm mostrado mais eficientes para este tipo de rotores estão os mancais aerostáticos, isto é, mancais lubrificados a ar e pressurizados externamente, e isso se deve a várias das características específicas dos mancais aerostáticos<sup>1</sup>. Uma de suas principais vantagens é a baixa fricção, o que proporciona uma alta eficiência mecânica com pouco aquecimento. Daí decorre um desgaste muito pequeno e pouca ou nenhuma necessidade de manutenção. A utilização de gás ou ar como lubrificante permite que este tipo de mancal seja operado em uma faixa muito ampla de temperaturas. Outra vantagem é que as características do filme de lubrificante fazem com que o munhão adquira um posicionamento definido, além de propiciar uma operação muito mais suave e silenciosa do que a conseguida com mancais de rolamento de esfera.

O emprego de mancais aerostáticos rígidos convencionais apresenta, porém, algumas limitações. Um dos problemas é devido

ao fato de que estes mancais exigem em sua fabricação a obtenção de tolerâncias relativamente apertadas. Isto implica numa baixa capacidade de acomodar eventuais desalinhamentos ou distorções decorrentes de gradientes de temperatura. Um outro problema é a ocorrência de instabilidades e vibrações descontroladas a certas velocidades críticas, principalmente a instabilidade conhecida como "half-frequency whirl". Este fenômeno está ligado à rigidez e aos amortecimentos presentes no mancal, e tem como consequência limitar a máxima velocidade em que pode ser empregado.

A solução para estes problemas tem sido procurada basicamente em três direções<sup>2</sup>. A primeira delas procura alterar as características de rigidez e amortecimento do filme de lubrificante através de modificações na forma das superfícies do munhão e da casca, introduzindo ranhuras de formas variadas ou alterando os orifícios de injeção de ar.

Uma outra linha de soluções é buscada pela montagem de mancais rígidos em suportes flexíveis. Desta forma a rigidez e o amortecimento do mancal podem ser alterados independentemente do filme de lubrificante.

Uma terceira linha de soluções é a construção de mancais flexíveis, através do emprego de folhas para formar a casca do mancal, montadas das mais variadas formas.

É nesta família de mancais que se insere o tipo estudado neste trabalho.

Os mancais de folha têm sido estudados teórica e experimentalmente desde 1953 aproximadamente<sup>3</sup>. Sua origem, entretanto, é tão antiga quanto a fabricação contínua de folhas, filmes ou tecidos<sup>4</sup>. Apesar disso, o assunto atraiu pouca atenção até que o interesse foi despertado pelo aparecimento das máquinas de pro

cessamento de dados eletrônicas, onde surge o problema da movimentação de fitas magnéticas a grande velocidade e gravação sobre materiais flexíveis. A partir daí foram realizados muitos estudos teóricos e experimentais encarando este tipo de mancal do ponto de vista da movimentação de folhas, onde o problema é colocado sob a forma de uma fita flexível movendo-se sobre uma superfície fixa cilíndrica ou de algum outro perfil arbitrário<sup>5</sup>. Só mais recentemente foram realizados estudos visando a utilização de mancais de folha como suporte de rotores de alta velocidade, com trabalhos de Stahler<sup>6</sup>, testando um rotor vertical de 1 polegada de diâmetro a 350000 rpm, e de Licht<sup>7,2</sup>.

As principais vantagens do mancal de folha estão ligadas à sua flexibilidade. Assim, ele é capaz de acomodar com facilidade distorções por variação de temperatura e desalinhamentos. A penetração de partículas abrasivas é muito mais bem tolerada do que em qualquer mancal rígido, e por isso os mancais de folha apresentam um desgaste muito pequeno.

Outra vantagem é a ausência de fenômeno de instabilidade conhecido como "half-frequency whirl", como demonstrado por Licht<sup>8</sup>. Além disso, se por efeito de vibrações ou outra causa qualquer, ocorrer o contato do munhão com a casca do mancal, os efeitos são muito menos danosos do que no caso dos mancais rígidos.

O presente trabalho é baseado no estudo feito por Licht de um mancal de folha de 3 gomos, construído com folhas de aço de 0,025 mm de espessura por 25 mm de largura, pressurizado, como suporte de um eixo de aço de 50 mm de diâmetro.

O objetivo deste trabalho, do ponto de vista experimental, é verificar a possibilidade de construir e operar um mancal

de folha semelhante ao utilizado por Licht, com algumas modificações feitas no sentido de facilitar a fabricação. As principais alterações em relação ao mancal usado por Licht são a utilização de folhas mais espessas e mais disponíveis no mercado (folhas de bronze fosforoso de 0,15 mm de espessura) e a injeção de ar através das folhas, ao contrário de Licht que injeta o ar por dentro do eixo. Além do estudo da técnica de fabricação, procura-se investigar o comportamento do mancal em relação a diversas velocidades de rotação, velocidades máximas alcançadas, estabilidade e separação entre as folhas e o munhão.

Procurou-se também verificar a possibilidade de avaliar em primeira aproximação os parâmetros principais do mancal, relacionando a folga ou separação entre o munhão e a casca, a pressão de alimentação e a capacidade de carga, através de um cálculo teórico simples.

## CAPÍTULO II

## DESCRIÇÃO DO MANCAL DE FOLHA

O mancal estudado é um mancal radial pressurizado, lubrificado a ar, mostrado na figura 2.1.

O mancal é constituído por três folhas de bronze fosforoso (1) de 0,15 mm de espessura e 40 mm de largura, que envolvem o munhão (2) de 60 mm de diâmetro. As três folhas são presas pelas extremidades, duas a duas, por três dispositivos de fixação (3), ligados a três tirantes (4), igualmente espaçados em torno do eixo do mancal.

Um anel de aço (5) de 120 mm de diâmetro interno, 160 mm de diâmetro externo e 20 mm de altura serve de suporte dos tirantes. Cada tirante atravessa um pino furado (6) preso ao anel. Uma porca (7) atarrachada à extremidade do tirante comprime uma mola helicoidal (8) contra o pino, permitindo o tensionamento dos tirantes.

As três folhas do mancal envolvem o munhão, cada uma abrangendo uma região de "contato" de 60° em torno do eixo do mancal, e igualmente espaçadas. Nestas regiões de "contato" é injetado ar comprimido para produzir a lubrificação, ou seja, a separação entre as folhas e o munhão.

O ar comprimido é injetado através de tubos de cobre (9) de 3,2 mm de diâmetro externo e 1,7 mm de diâmetro interno, soldados à parte externa das folhas, dois em cada região de "contato". Na face interna das folhas são feitos furos de 0,3 mm de diâmetro nas regiões soldadas aos tubos, três para cada tubo. Estes furos

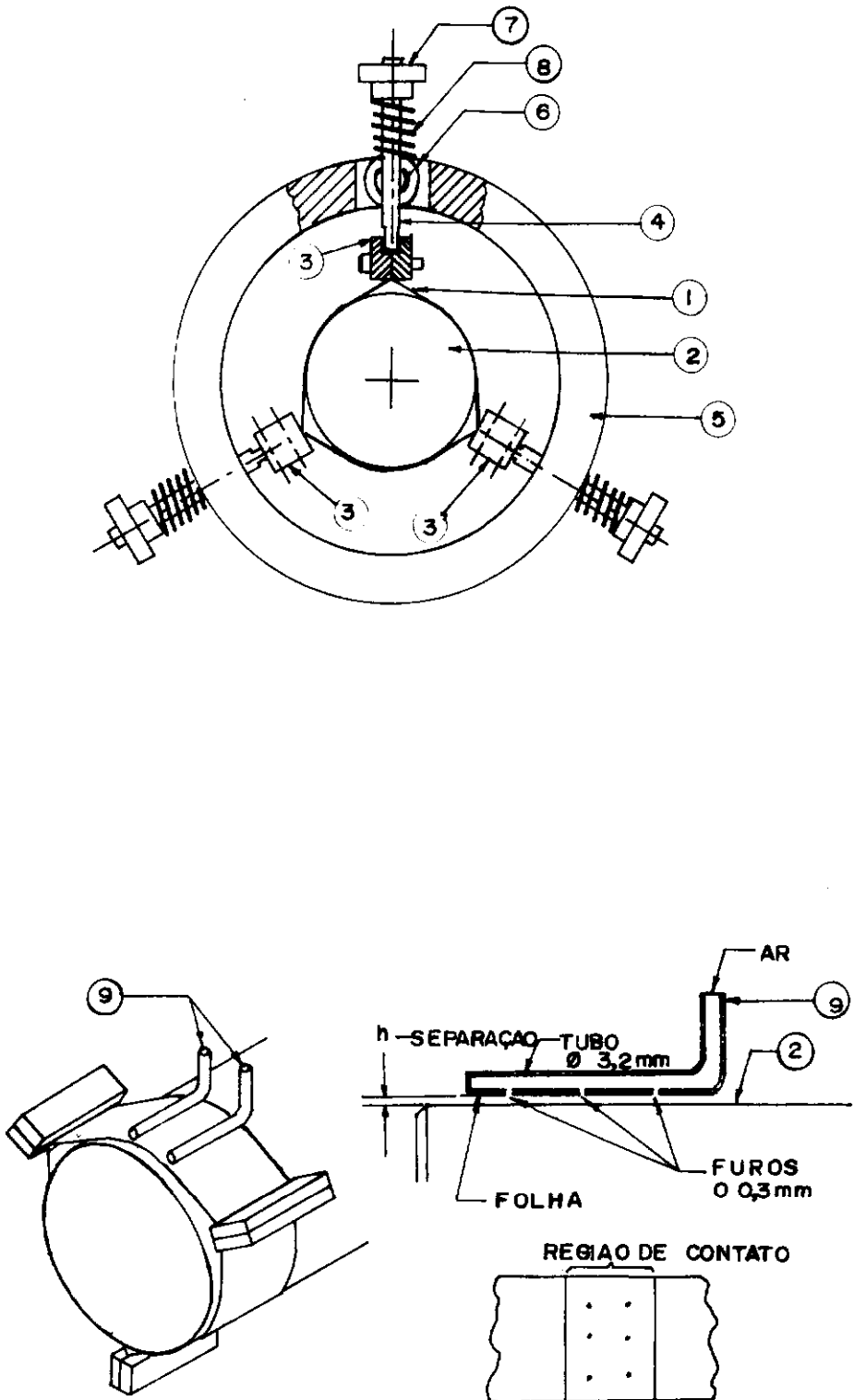


FIG. 2.1 - MANCAL DE FOLHA

atravessam também a parede do tubo, de modo que permitem que o ar do interior dos tubos seja injetado entre as folhas e o munhão.

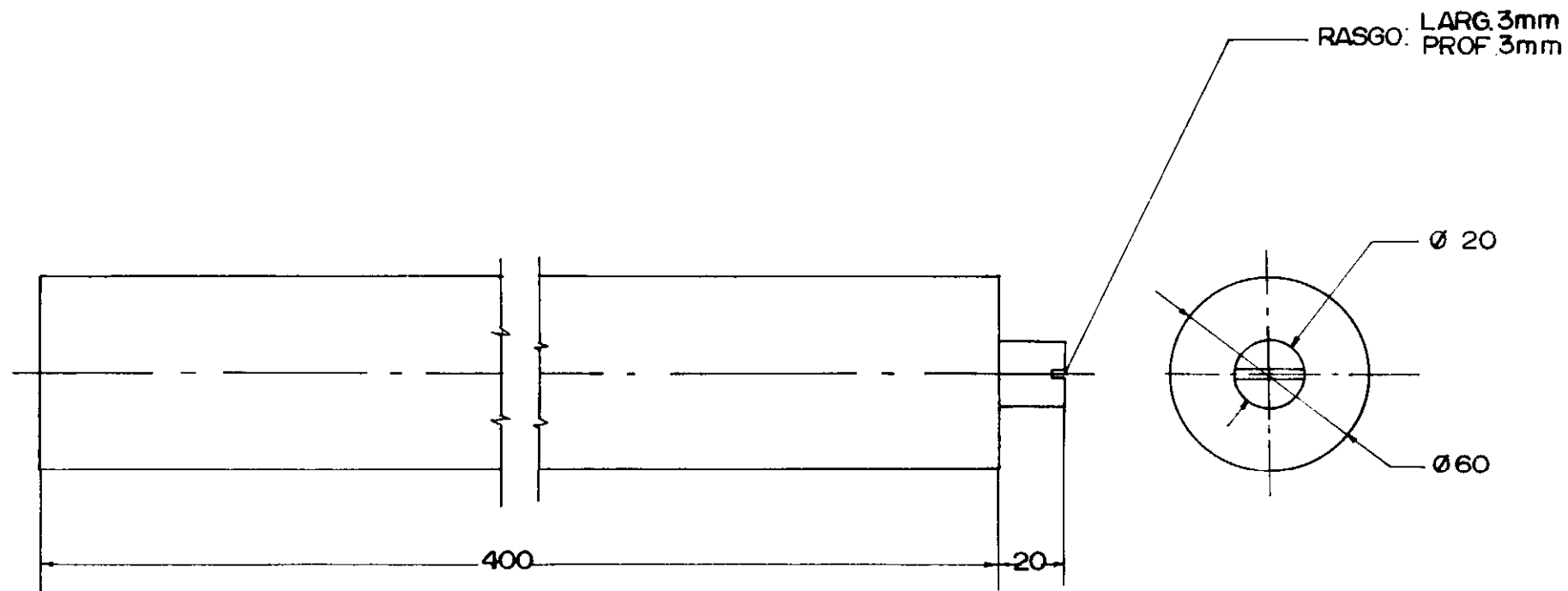
O munhão é feito de aço inoxidável austenítico, com acabamento por lapidação, apresentando uma superfície com rugosidade entre  $R_a = 0,3 \mu\text{m}$  e  $R_a = 0,6 \mu\text{m}$  ( $R_a$ =desvio médio aritmético).

Para testar o mancal é necessário girar o munhão de modo que o eixo deste se mantenha alinhado com o eixo do mancal, e também evitar deslocamentos na direção axial. Para isso utilizou-se um eixo de aço em posição vertical, apoiado em um mancal de escora na extremidade inferior e sustentado radialmente por dois mancais de folha, situados junto às extremidades inferior e superior do eixo que funcionam como munhões.

Todo o peso do eixo é sustentado pelo mancal de escora, que também atua restringindo o movimento na direção axial. O alinhamento vertical é mantido pelos dois mancais radiais colocados junto às extremidades do eixo.

O eixo é um cilindro de aço inoxidável austenítico tipo 18-8 de 60 mm de diâmetro, 400 mm de comprimento e pesando aproximadamente 10 Kgf (ver figura 2.2).

Na extremidade superior do eixo há um prolongamento com diâmetro de 20 mm e 20 mm de comprimento, provido de um rasgo no topo de 3 mm de largura por 3 mm de profundidade, por onde é feita a conexão com o motor de acionamento.



COTAS EM mm

FIG. 2.2 - EIXO



## CAPÍTULO III

## EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

Os principais componentes do equipamento experimental para teste do mancal de folha são mostrados na figura 3.1 .

O eixo vertical (1) é suportado axialmente por um mancal de escora hidrostático lubrificado a ar (2) e radialmente pelos dois mancais de folha (3).

A estrutura do banco de teste é formada por quatro colunas de cantoneiras de aço (4), dispostas nos vértices de um quadrado de 200 mm de lado e apoiadas sobre uma mesa de aço (5). Nestas colunas são fixadas duas plataformas quadradas (6) providas de um furo central, de 120 mm de diâmetro, por onde passa o eixo. Sobre cada uma destas plataformas é montado um anel de aço (7) , de 120 mm de diâmetro interno e 160 mm de diâmetro externo, que serve para fixação dos tirantes (8) dos mancais radiais.

Uma terceira plataforma (9), colocada no topo da estrutura, serve de suporte para o motor a ar comprimido (10) que aciona o eixo. O motor é montado em um suporte (11) que permite um ajuste da altura em que é colocado.

Foi utilizado um motor marca "Von Arx" tipo DS 22, com potência máxima de 0,95 HP, velocidade máxima de 22000 rpm e consumo de 680  $\ell$ /min. Essa potência foi escolhida para se obter um torque suficiente com velocidades baixas.

O motor é conectado ao eixo através de uma peça intermediária de resina acrílica, que permite a acomodação de pequenos desalinhamentos (ver figura 3.2).

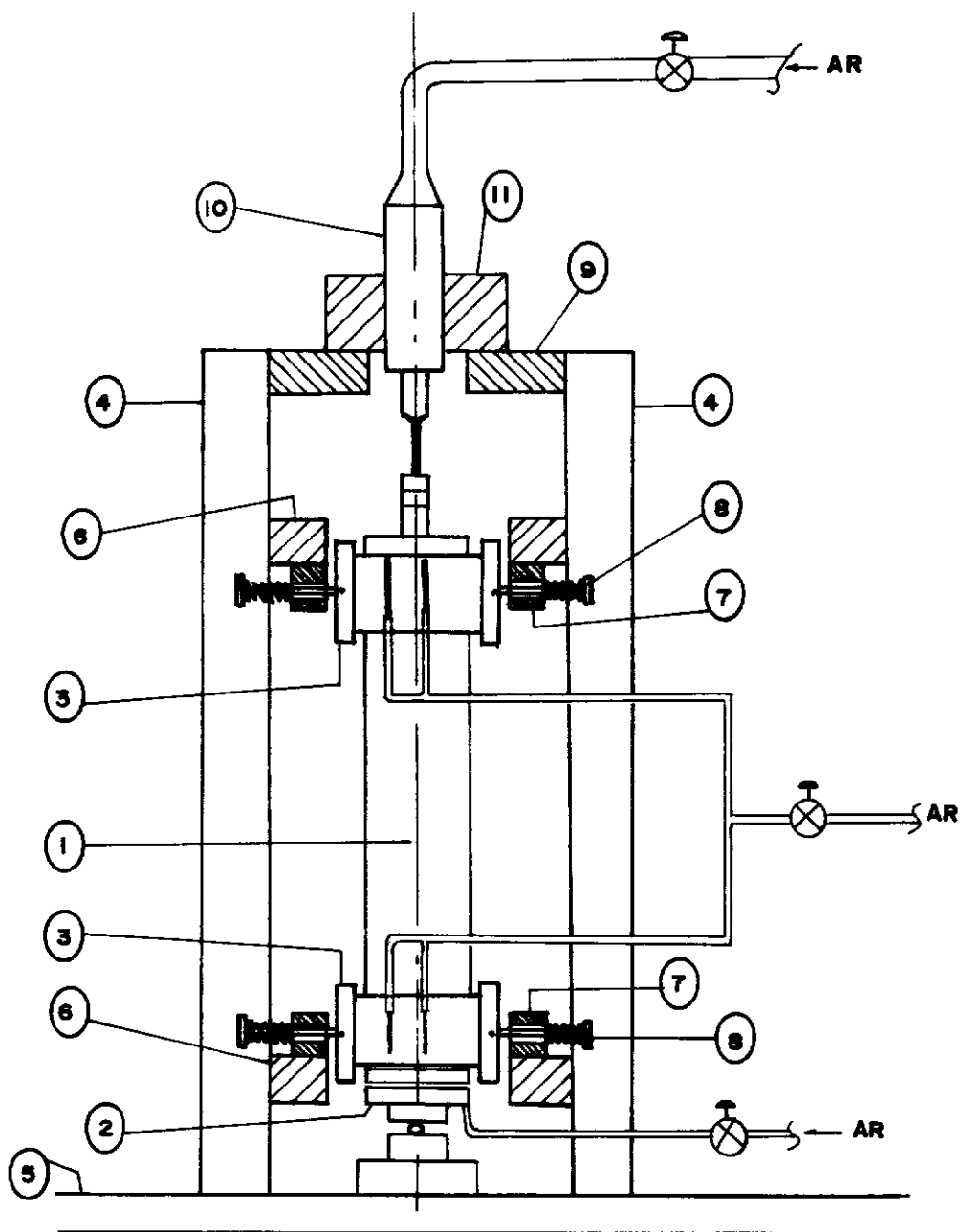


FIG. 3 . 1. - EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL  
BANCO DE TESTE

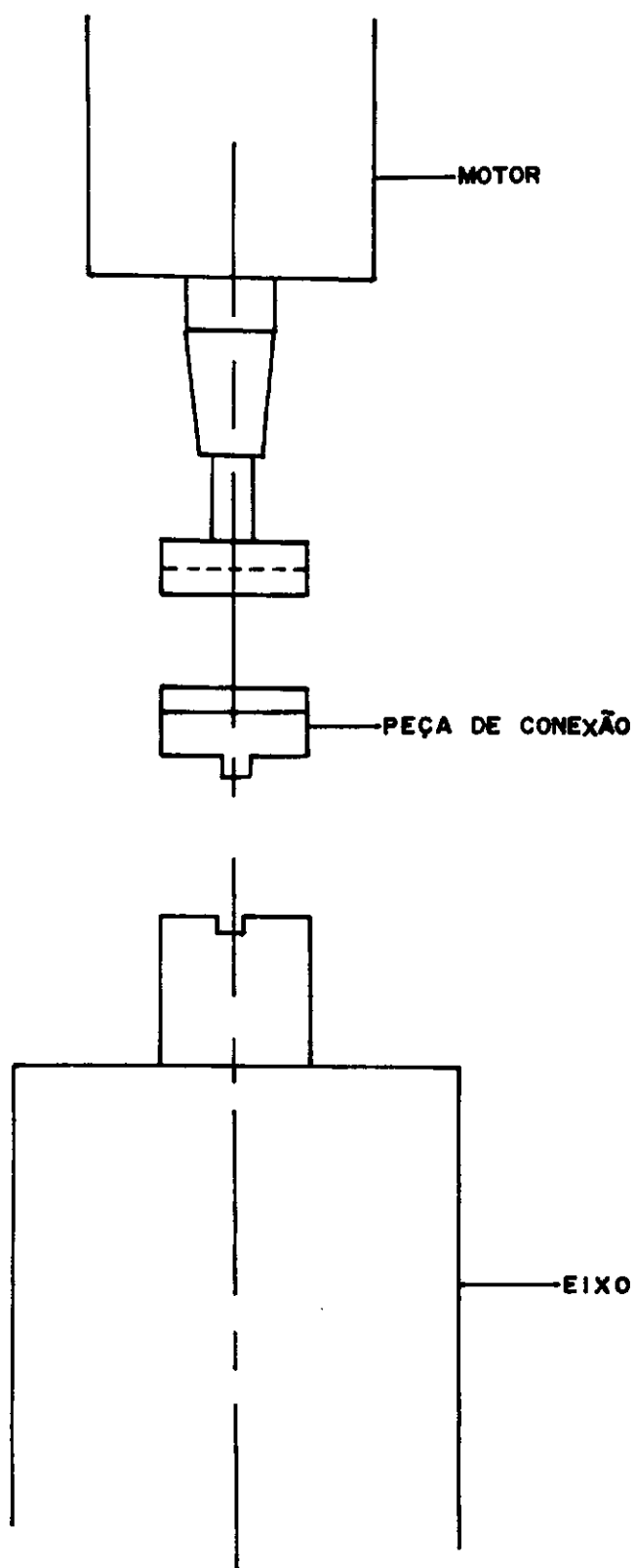


FIG. 3 . 2 - CONEXÃO ENTRE O MOTOR E O EIXO

O ar comprimido que alimenta os mancais e o motor é fornecido por um compressor "Primax" com motor de 7,5 HP que fornece uma pressão máxima de  $12,3 \text{ Kg/cm}^2$  a uma vazão de  $0,980 \text{ m}^3/\text{min}$ . equipado com um tanque com capacidade de 378 litros.

O controle de vazão e pressões é feito por três válvulas reguladoras de pressão independente : uma para o motor, outra para o mancal de escora e outra para os mancais radiais. Cada-uma das válvulas reguladoras de pressão possui um manômetro conjugado que permite medir a pressão fornecida aos mancais ou ao motor. As válvulas são conectadas aos mancais através de tubos de plástico flexível.

## CAPÍTULO IV

## EXECUÇÃO DOS MANCAIS DE FOLHA E DO EIXO

## 4.1 - Execução dos Mancais de Folha

Como mostrado no capítulo II, os mancais radiais de folha são constituídos cada um por três folhas iguais de bronze fosforoso. As dimensões das folhas são mostradas na fig. 4.1.1 . Em cada uma das extremidades de cada folha há um furo que é atravessado pelo parafuso central dos dispositivos de fixação.

Para executar o corte e a furação das folhas, foi construído um dispositivo (ver fig. 4.1.2) que consta de uma placa plana de aço (1) e de uma régua também de aço (2), com 40 mm de largura, que se ajusta sobre a placa sendo posicionada por dois pinos (3). A folha a ser cortada foi colocada entre a placa e a régua e o conjunto apertado firmemente com a ajuda de um sargento. A folha foi riscada e cortada ao longo dos lados da régua, que são paralelos. A régua e a placa são furadas (4) nas posições correspondentes aos furos a serem feitos na folha. Um punção(5) foi usado para fazer os furos na folha, funcionando a placa como matriz e o furo na régua como guia para o punção.

Depois de cortadas, as folhas foram montadas nos fixadores com o auxílio de um gabarito, de forma a garantir o paralelismo entre os fixadores e a igualdade entre os comprimentos livres das três folhas.

Antes da montagem foram marcadas sobre as folhas as posições onde devem ser soldados os tubos para a injeção de ar. A

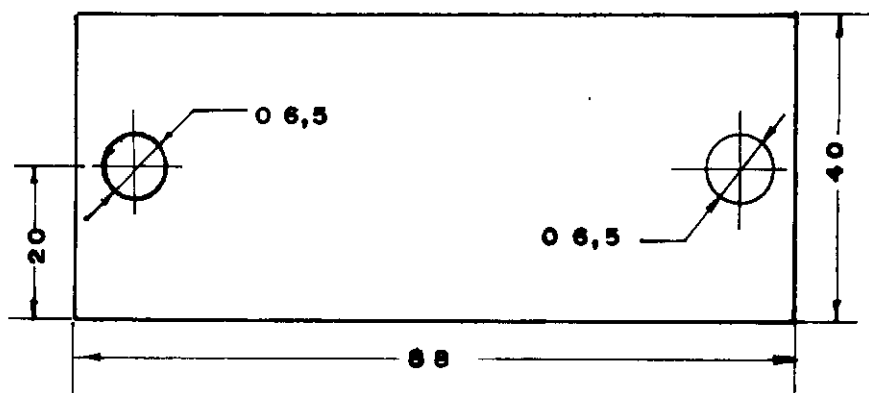


FIG. 4.1.1-DIMENSÕES DAS FOLHAS

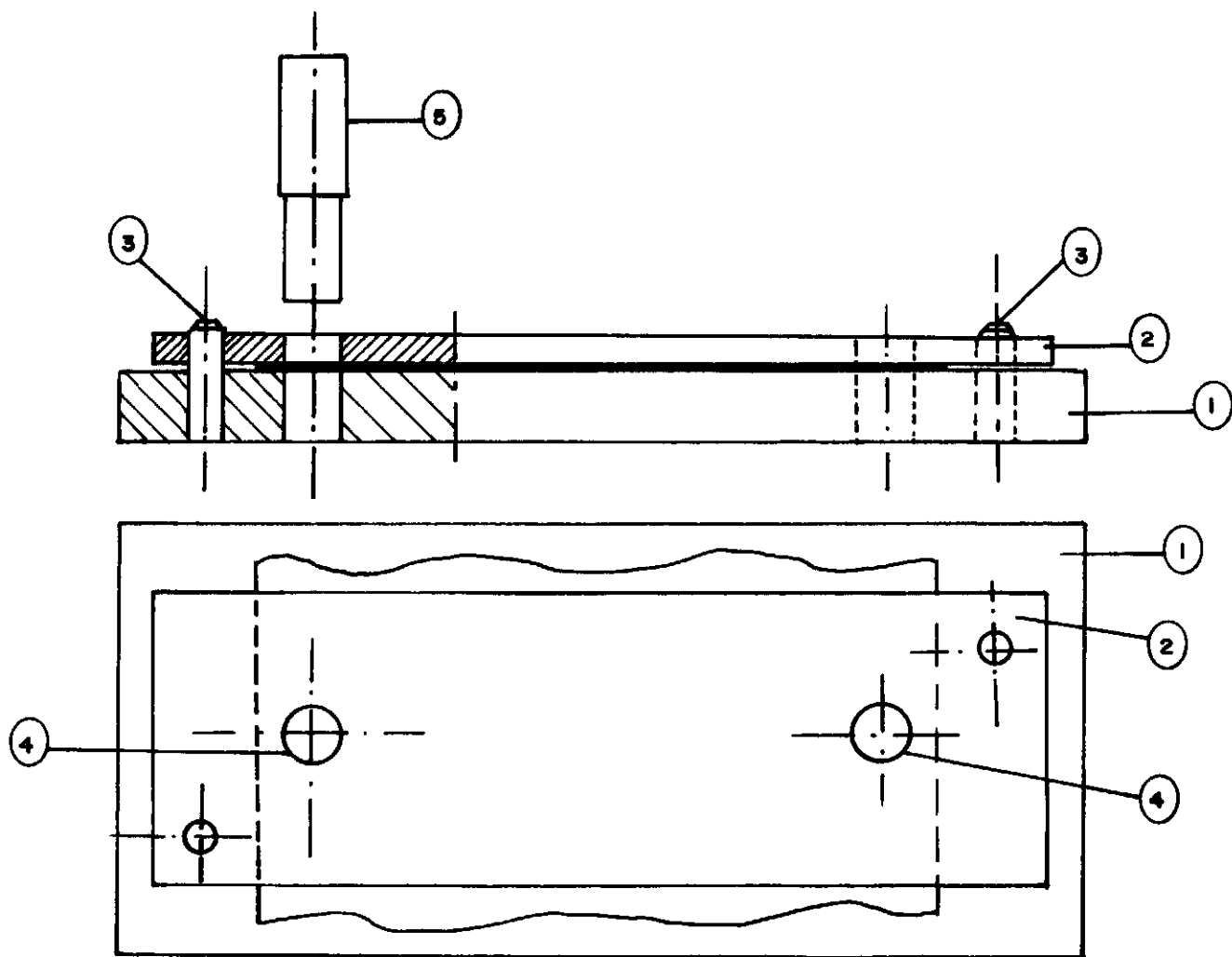


FIG. 4 . 1.2. - DISPOSITIVO PARA CORTE DAS FOLHAS

disposição dos tubos é mostrada na fig. 4.1.3 .

Para execução da soldagem dos tubos, o mancal foi montado em torno de um cilindro de madeira (1) (ver fig. 4.1.4) de mesmo diâmetro que o munhão de aço (60 mm), e tensionado por meio de tirantes (2). Os tubos (3) a serem soldados foram previamente cortados, dobrados, e uma das pontas obturada com solda de estanho. O primeiro tubo foi colocado em posição para ser soldado e seguro nesta posição por meio de uma haste (4) presa ao cilindro de madeira. Pequenos pedaços de solda de estanho (5) foram colocados sobre a região a ser soldada. Com o aquecimento local por uma chama de álcool (6), a solda se funde e corre ao longo do tubo, soldando-o à folha em toda a extensão em que estão em contato. O procedimento acima foi repetido para todos os tubos.

A posição dos furos de injeção de ar foi marcada com uma ponta de aço sobre a face interna das folhas do mancal aberto (um dos três fixadores das folhas foi retirado, abrindo-se o mancal).

A execução dos furos foi feita em uma furadeira vertical, utilizando-se sua mais alta velocidade de rotação (4000 rpm), com uma broca de 0,3 mm de diâmetro. A broca foi presa ao mandril da furadeira envolvida em um pequeno tubo de plástico (capa de fio), de modo que o mandril não mordesse diretamente sobre a broca, mas sobre o plástico. Esta maneira de prender a broca permite que esta deslize dentro do tubo de plástico sempre que sofrer esforços muito elevados. Por exemplo, se ela gripar na obra, a broca desliza em relação ao mandril que está girando evitando quebrar-se. A execução dos furos foi feita com o mancal seguro pelas mãos do operador e com a folha sendo pressionada contra a broca. Gotas de óleo solúvel foram colocadas sobre a região do furo para evitar embotamento por aquecimento.



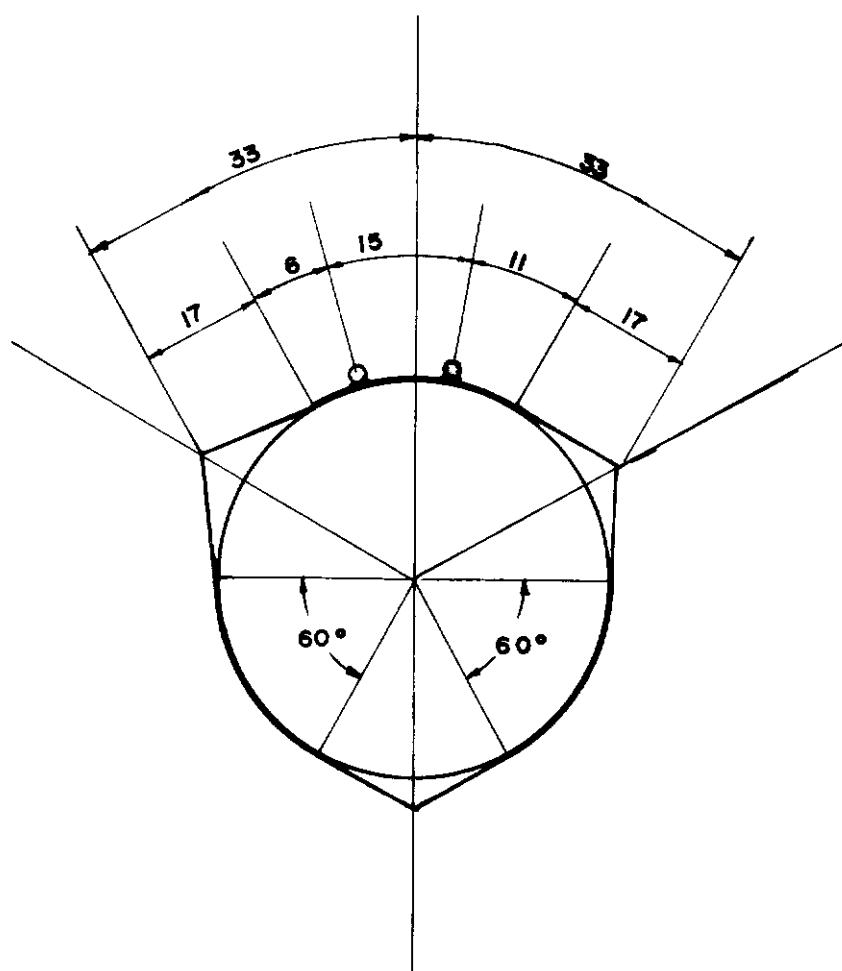


FIG. 4.1.3. - DISPOSIÇÃO DOS TUBOS

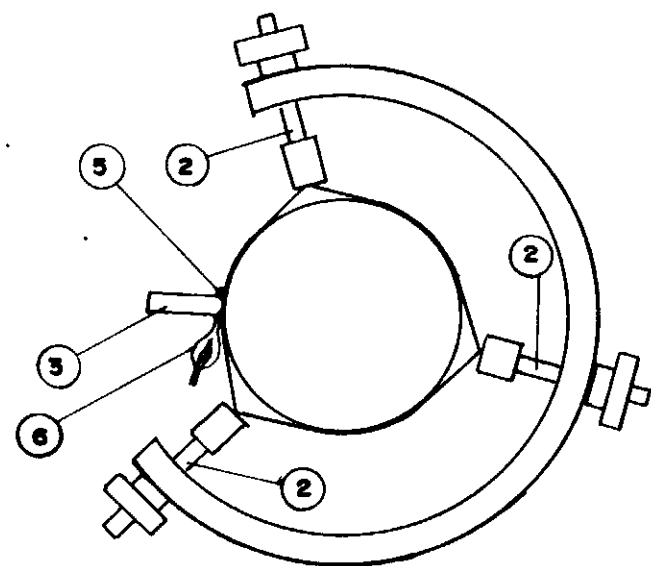
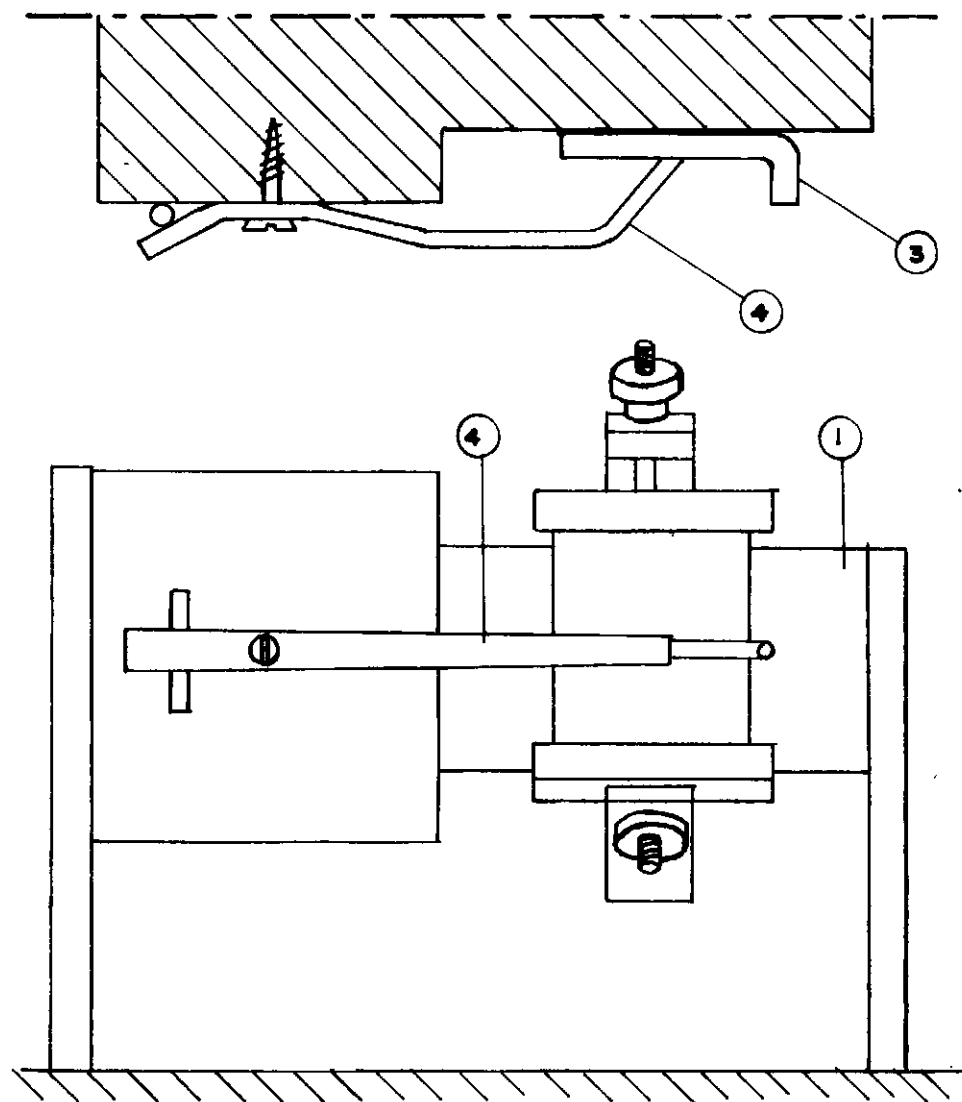


FIG. 4.1.4. - SOLDAGEM DOS TUBOS

Após executados os furos, os mancais foram novamente montados em torno do eixo e foi dado o último passe de lapidação nos munhões, utilizando-se os próprios mancais como lapidadores. Com isso, a superfície interna das folhas também recebeu um acabamento final, acomodando-se sobre os munhões.

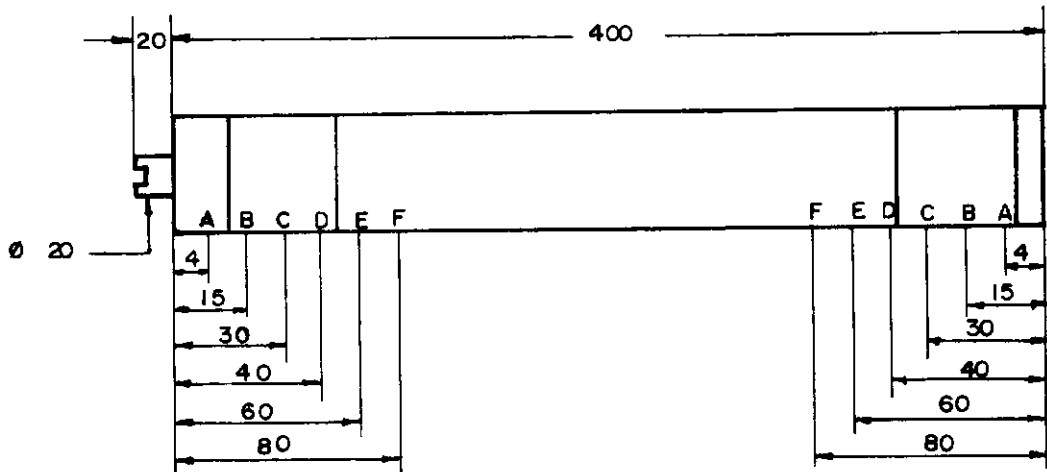
Foi feita uma limpeza geral nos mancais e no eixo antes da montagem definitiva no banco de testes para retirar todo o resíduo de abrasivos.

#### 4.2 - Execução do Eixo

A execução do eixo foi realizada em duas etapas : torneamento e lapidação.

O torneamento foi feito entre pontas a partir de um tarugo de aço inoxidável de 65 mm de diâmetro. O prolongamento de 20 mm de diâmetro usinado na extremidade do eixo é importante para permitir a fixação do grampo de arraste durante o torneamento. As dimensões desejadas foram obtidas com bastante precisão (ver fig. 4.2.1) e a rugosidade da superfície cilíndrica, após o torneamento foi da ordem de  $R_a = 10 \mu m$ .

A lapidação dos munhões (ver fig. 4.2.2) foi feita com o eixo (1) preso à placa universal do torno (2) pelo prolongamento da extremidade superior (3) e apoiado a meio comprimento de modo que quase todo o peso fosse sustentado pelo apoio intermediário (4). Na extremidade presa à placa usou-se uma luva de plástico (5) (tubo de plástico), de modo que as castanhas não entrassem em contato com o eixo, mas mordesse sobre o plástico, permitindo um certo grau de flexibilidade nesta fixação. A lapidação



	1	2	3	Ra
A	60,08	60,02	60,02	
B	60,02	60,02	60,02	0,35
C	60,03	60,03	60,03	
D	60,03	60,03	60,03	0,45
E	60,04	60,04	60,04	0,30
F	60,05	60,05	60,05	

	1	2	3	Ra
A	59,96	59,96	59,96	
B	59,97	59,97	59,97	0,60
C	59,98	59,98	59,98	
D	59,99	59,99	59,99	0,50
E	60,00	60,00	60,00	
F	60,00	60,00	60,00	0,35

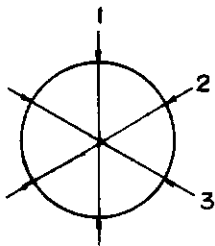


FIG. 4-2-1 — DIMENSÕES DO EIXO

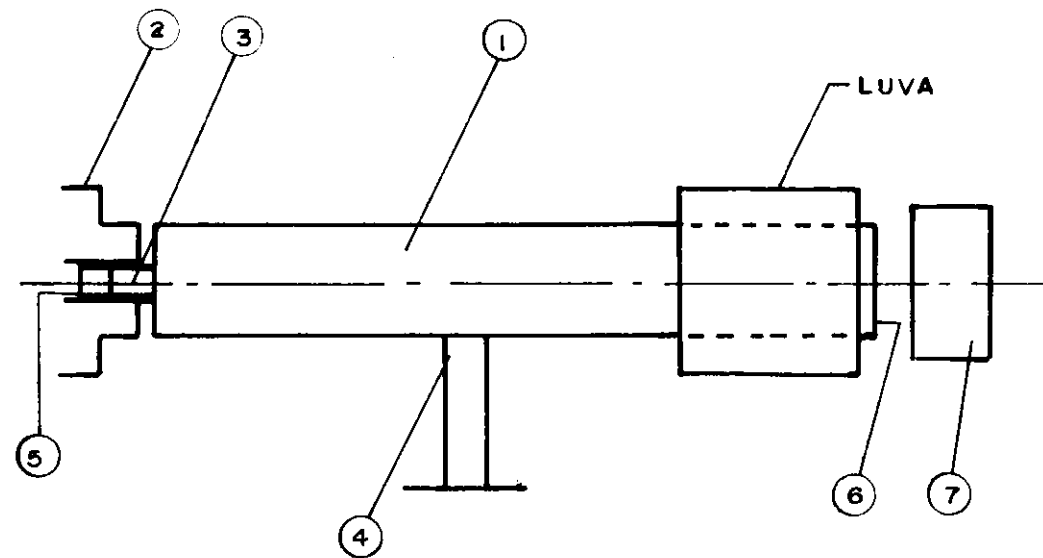


FIG. 4 .2.2. - LAPIDAÇÃO DOS MUNHÕES

foi feita em rotação lenta, 40 ou 64 rpm.

#### 4.2.1. - Lapidação da face plana inferior

Para a lapidação da face plana inferior do eixo (6), foi utilizado como lapidador uma peça de aço carbono (7) com uma superfície plana previamente obtida por faceamento no torno.

Inicialmente foi usada pasta abrasiva marca Carborundum nº 277. Esta pasta é fornecida em duas granulações diferentes, uma grossa e outra fina, sem especificação do tamanho dos grãos. A lapidação foi feita com pasta grossa inicialmente até se obter uma superfície uniforme, sem marcas da ferramenta do torno. A seguir foi usada a pasta fina, até se obter uma superfície de aspecto uniforme e de menor rugosidade.

É indispensável uma perfeita limpeza entre uma fase e outra.

A seguir foi utilizada como pasta abrasiva uma mistura de óleo mineral filtrado e pó abrasivo nº 1000. Com isso foi obtida uma superfície uniforme, lisa e plana, a um grau julgado suficiente, o que pôde ser constatado por uma certa dificuldade em separar as duas superfícies perfeitamente limpas e secas, do eixo e do lapidador, quando postas em contato.

Foi feito ainda um acabamento final, utilizando como lapidador o próprio mancal de escora, que é de alumínio e cuja superfície já pronta havia sido obtida também por lapidação. Nesta operação foi usado pó nº 1000 e óleo.

#### 4.2.2 - Lapidação dos Munhões dos Mancais Radiais

Para a lapidação dos munhões dos mancais radiais foi utilizada inicialmente uma luva bipartida usinada em aço carbono. Entretanto este não é o material mais adequado para este tipo de operação. Isto pôde ser constatado pela dificuldade de evitar aranhões na superfície, que parecem ser causados por pequenas partículas do material lapidador que se desprendem de sua superfí-cie e riscam ambas as superfícies. O material mais adequado seria o ferro fundido <sup>9</sup>. Devido à dificuldade de se obter uma luva deste material, foi feita uma outra, em alumínio. Esta se mostrou mais adequada que a de aço, se bem que ainda apresentando alguns problemas, mas foi possível executar a lapidação até o fim com esta luva.

Os abrasivos utilizados e a sequência de operações foram as mesmas empregadas na lapidação de face plana inferior. A perfeita limpeza de todas as partes, principalmente quando se passa de uma granulação para outra mais fina mostrou-se de grande importância para o êxito da lapidação.

Após a lapidação, foi obtida uma rugosidade entre  $R_a = 0,3 \mu m$  e  $R_a = 0,6 \mu m$  (ver fig. 4.2.1). Os últimos passes foram feitos com pó abrasivo nº 2000. Também neste caso o acabamento final foi feito utilizando como lapidador os próprios mancais radiais.

## CAPÍTULO V

## SISTEMA DE MEDIDAS

Para se estudar o comportamento do mancal de folha, é necessário conhecer um grupo de parâmetros que possam caracterizar o funcionamento do mancal.

Os parâmetros adotados para realizar o estudo do mancal foram :

- Velocidade de rotação do eixo - a faixa de funcionamento do mancal, fenômenos de instabilidade e o comportamento de todos os outros parâmetros é sempre referida à velocidade de rotação em que o mancal está operando.
- Contato entre as folhas e o munhão - a não existência de contato caracteriza a existência da lubrificação, ou seja, a formação do filme de ar entre as folhas e o munhão.
- Separação entre as folhas e o munhão - comumente denotada por  $h$  na literatura, a distância entre o munhão e a casca do mancal (as folhas, no caso) é um dos parâmetros determinantes do escoamento do lubrificante e da distribuição de pressões no filme de lubrificante, influenciando diretamente na capacidade de carga do mancal.
- Pressão de alimentação - a pressão do ar fornecido ao mancal, ou seja, a pressão antes dos orifícios por



onde o ar é injetado entre as folhas e o munhão é , junto com a separação  $h$ , um dos parâmetros determinantes do escoamento do lubrificante e influencia diretamente a capacidade de carga do mancal.

- Tensão nos tirantes - pela geometria do mancal estudado (ver seção 7.2), e pelo fato de o eixo girar na posição vertical, a tensão nos tirantes equivale ao carregamento a que o mancal está submetido, se não computarmos os esforços horizontais devidos a desbalanceamento no eixo.
- Rigidez do mancal - uma das características principais deste tipo de mancal é a baixa rigidez. Este parâmetro tem grande influência no comportamento dinâmico do mancal.

O conhecimento destes parâmetros pode ser procurado através de cálculo teórico ou experimentalmente. No estudo experimental feito sobre o protótipo montado no laboratório, estes parâmetros foram medidos ao longo dos testes a que foi submetido o mancal . Estas medidas foram feitas utilizando dispositivos adequados, montados para tal fim, descritos a seguir.

### 5.1 - Medida de Velocidade

As medidas de velocidade de rotação do eixo foram feitas utilizando luz estroboscópica. Uma marca de tinta feita na parte média do eixo serve como referência.

Foi utilizado um estroboscópio "1531-AB Strobotac", General Radio, com faixas de medidas: 110 a 690rpm, 670 a 4170rpm e 4000 a 25000 rpm. Este instrumento apresenta uma precisão de  $\pm 1 \%$ .

### 5.2 - Detecção de contato entre o eixo e os mancais

Para se verificar a existência ou não de contato entre o eixo e os mancais, foi utilizado um circuito elétrico que permite verificar a passagem ou não de uma corrente elétrica entre o eixo e os mancais. O circuito é mostrado na figura 5.2 .

Duas lâminas finas de bronze fosforoso (1) e (2) são colocadas em contato com o eixo (3), que está em contato com os mancais radiais (4), que por sua vez estão ligados à terra. O eixo só entra em contato com a terra através dos mancais radiais, pois o mancal de escora (6) está isolado e a peça de acrílico (5) que serve de conexão com o motor impede que haja contato elétrico entre o eixo e o motor.

Com o comutador (C) na posição A o eixo fecha o circuito entre as lâminas (1) e (2) e a corrente fornecida pela fonte (F) passa através da resistência (R) vai à lâmina (1), passa pelo eixo e volta pela lâmina (2). O voltímetro (V) permite medir a queda de tensão na resistência (R), mostrando a existência ou não de corrente no circuito descrito acima. Isso permite verifi-

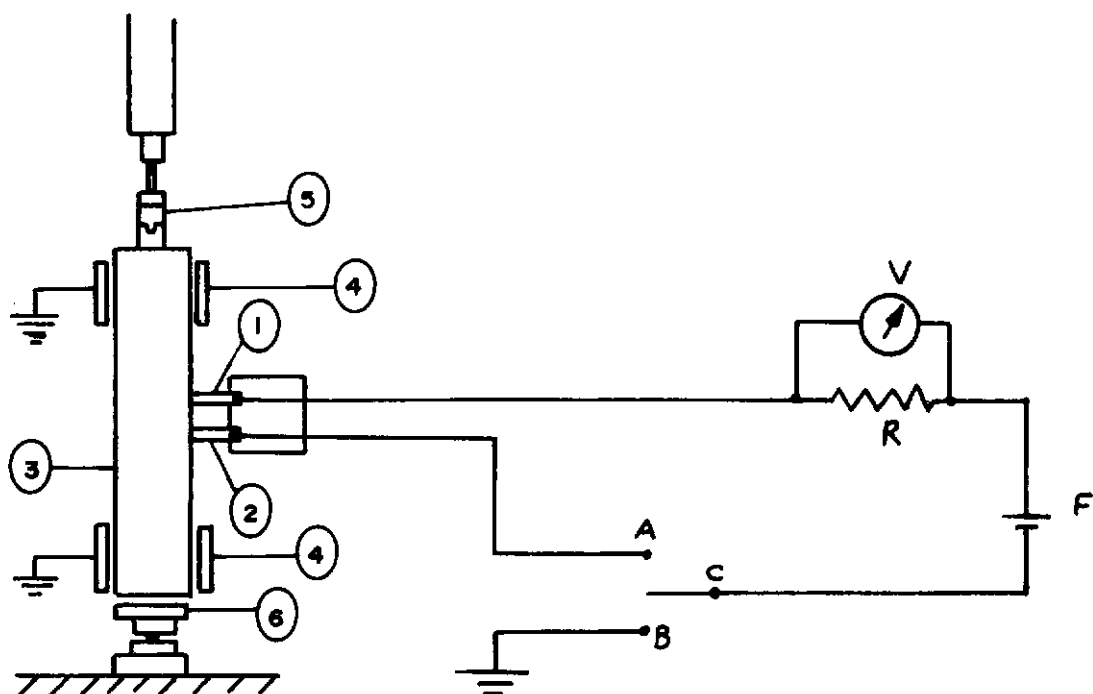


FIG. 5. 2 - DETECTOR DE CONTATO

car, a qualquer momento, se as lâminas estão realmente em contato elétrico com o eixo.

Com o comutador (C) na posição B, a corrente fornecida pela fonte (F) atravessa a resistência (R), passa pela lâmina (1) para o eixo e, se houver contato entre o eixo e os mancais radiais, o circuito se fechará através da terra, e a corrente será detectada pelo voltímetro (V). Caso haja separação total entre o eixo e os mancais radiais, o circuito ficará aberto, não havendo corrente na resistência (R), e a queda de tensão mostrada pelo voltímetro será nula. O voltímetro também dá uma indicação percentual do grau de contato entre o eixo e os mancais radiais. A tensão na fonte e a resistência variável (R) são reguladas de modo que o voltímetro indique, com o circuito fechado, 5 volts, o que corresponderá a 100% de corrente no circuito. Caso o contato entre os mancais e o eixo não seja muito firme, a corrente será menor, e o voltímetro indicará uma tensão menor.

Com o eixo em movimento, pode-se verificar, com o comutador na posição A, se a corrente chega ao eixo, e colocando o comutador na posição B, verifica-se a passagem de corrente do eixo para os mancais.

### 5.3 - Medida da Separação entre as Folhas e o Munhão

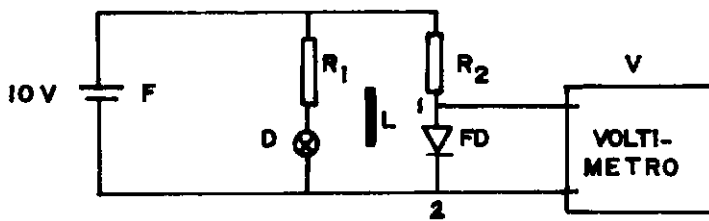
O escoamento do ar injetado entre as folhas e o munhão forma um filme de ar que provoca o afastamento das folhas em relação ao munhão. A espessura do filme chama-se "separação" e denota-se por  $h$ .

A separação foi medida por um transdutor fotoelétrico de deslocamento<sup>10</sup>. O esquema elétrico do transdutor é mostrado na

fig. 5.3.1 . Um foto-diodo (FD) (MRD 150, Motorola) recebe a luz emitida por um diodo emissor de luz (D). A resistência do foto-diodo varia com a intensidade da luz que recebe. Uma lingueta (L), ao se deslocar entre o diodo emissor e o foto-diodo, corta o feixe luminoso, alterando a intensidade da luz que o foto-diodo recebe. A corrente fornecida pela fonte F (fonte LABO, FR"25/50") passa pela resistência R2 em série com o foto-diodo. A variação da resistência deste faz variar a tensão entre os pontos 1 e 2 que é medida por um voltímetro (V) (foi utilizado um voltímetro digital "Data Precision Model 134"). A tensão lida pelo voltímetro pode ser calibrada com relação ao deslocamento da lingueta.

O transdutor de deslocamento foi montado como mostra a figura 5.3.2. O foto-diodo (1) e o diodo emissor (2) foram montados entre lâminas de fibra (3) nos dois lados de uma fenda (4) por onde passa a lingueta (5). A lingueta é dobrada formando uma mola (6) e presa ao corpo do transdutor por um parafuso (7). Na extremidade livre da lingueta é soldado um arame (8) formando uma ponta que se apoiará sobre o objeto cujo deslocamento se deseja medir. A lingueta pode se mover suavemente ao longo de um comprimento (9) (curso da lingueta) de cerca de 300  $\mu\text{m}$ , suficiente para cobrir ou descobrir completamente o foto-diodo.

Para calibrar o transdutor foi utilizado o dispositivo mostrado na fig. 5.3.3 . O transdutor (1) é posicionado fixo em relação a uma mesa (2) e com a lingueta (3) em contato com uma barra (4) também presa à mesa. Esta barra pode ser deslocada por flexão quando pressionada pelo parafuso (5). O deslocamento da lingueta é medido pelo relógio comparador (6), graduado em microns. A tabela 5.3 mostra os dados obtidos durante a calibração do transdutor. O gráfico 5.3 mostra a curva de calibração obtida.



**F - FONTE DE TENSÃO**  
**D - DIODO EMISSOR DE LUZ**  
**FD- FOTO DIODO**  
**R<sub>1</sub> - RESISTÊNCIA 460  $\Omega$**   
**R<sub>2</sub> - RESISTÊNCIA 400K $\Omega$**

**FIG.5.3.1. - CIRCUITO DO TRANSDUTOR FOTO ELÉTRICO DO DESLOCAMENTO**

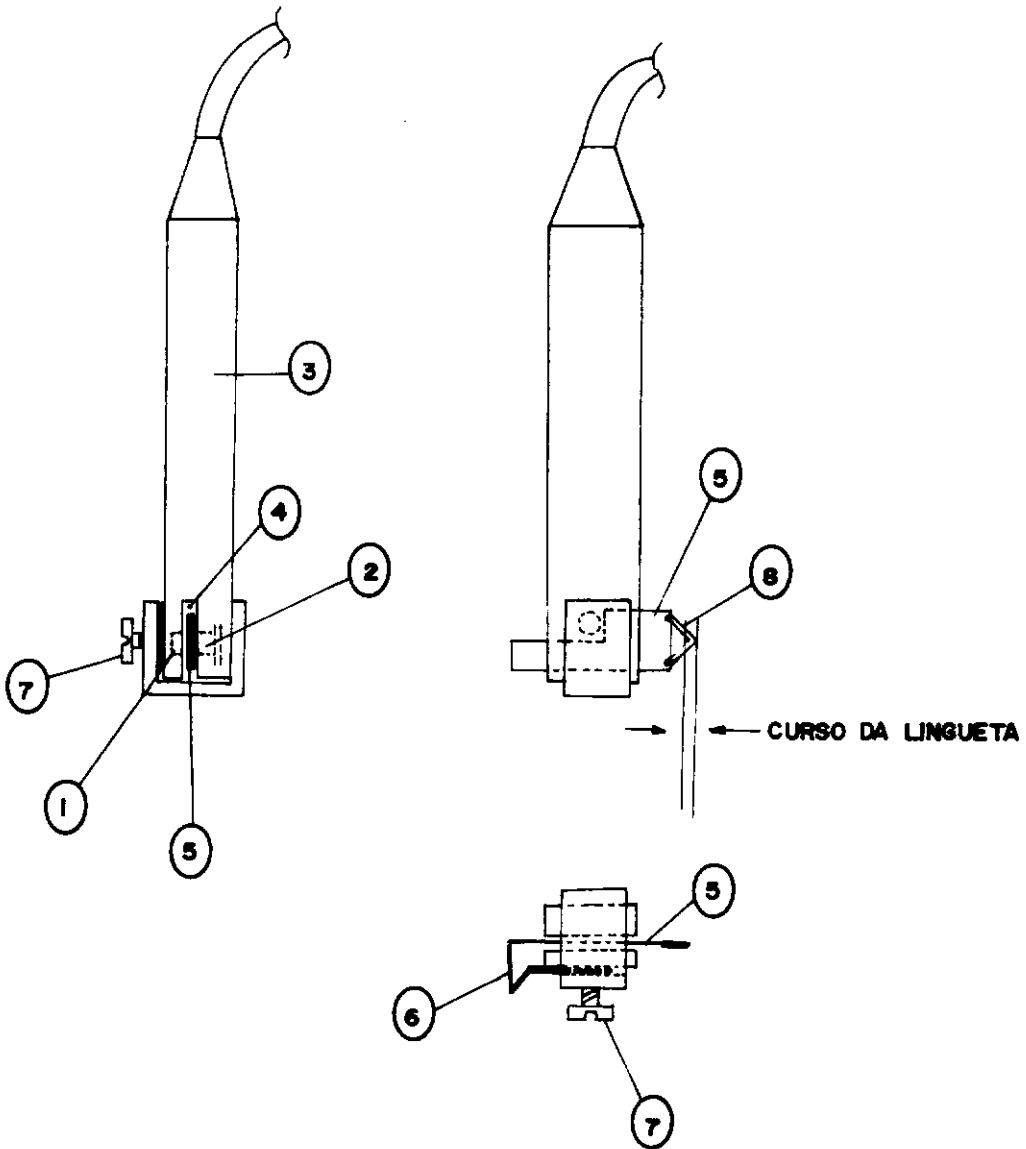


FIG. 5.3.2 - MONTAGEM DO TRANSDUTOR

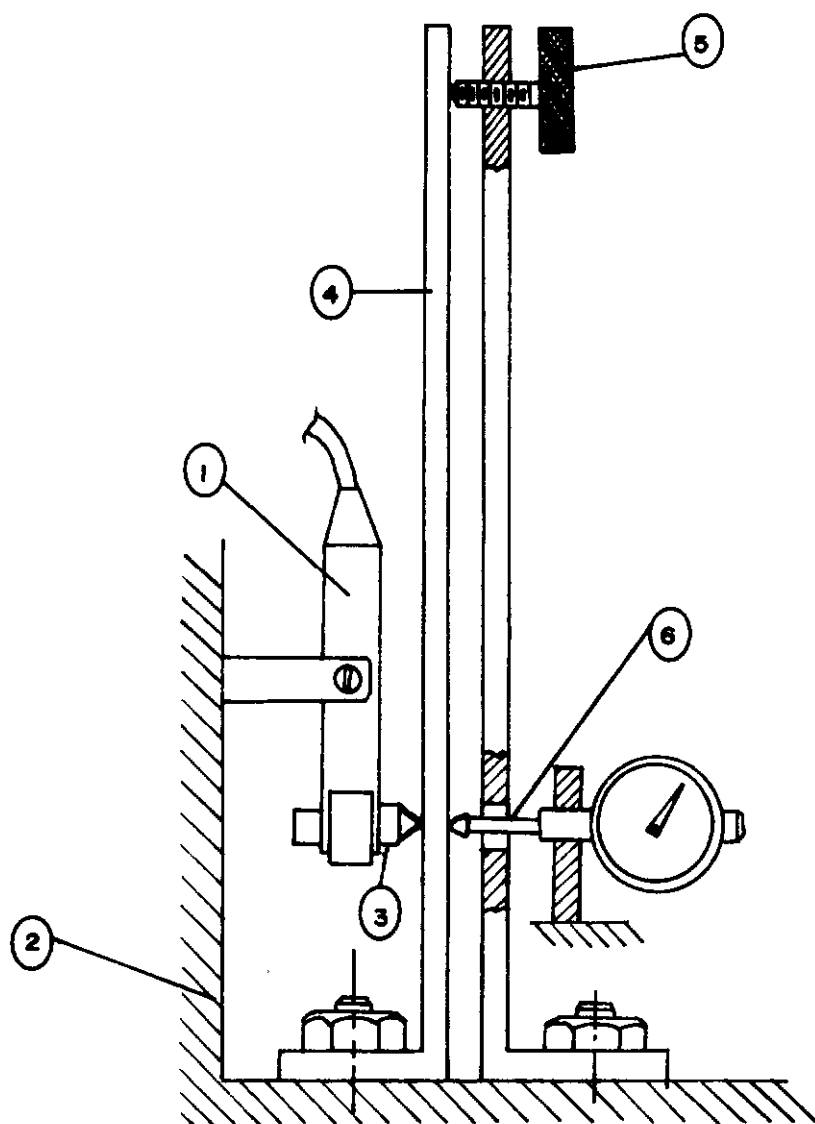


FIG. 5.3.3 - CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR.

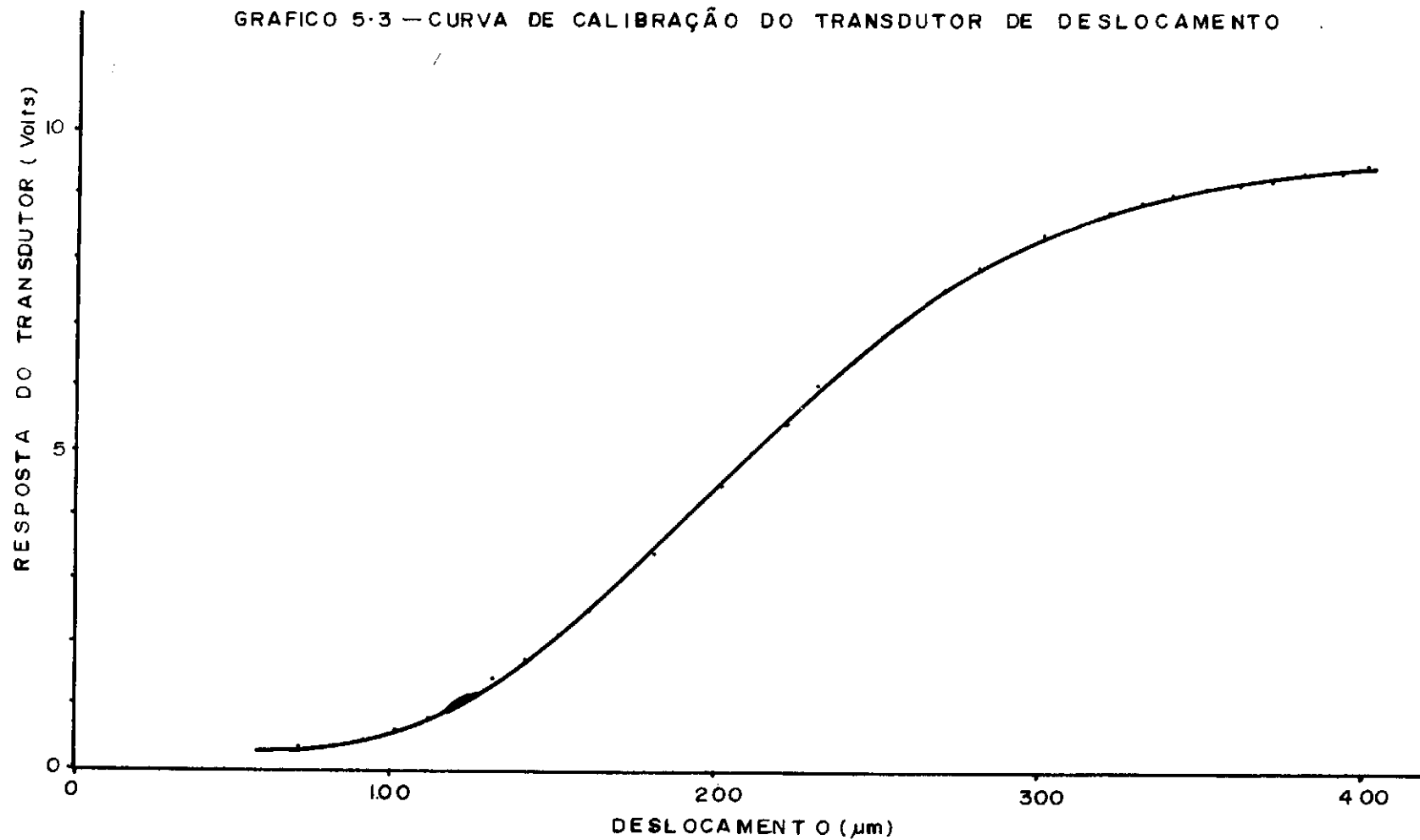


TABELA 5.3

## CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO

Deslocamento ( $\mu\text{m}$ )	Resposta do voltímetro (Volts)	Deslocamento ( $\mu\text{m}$ )	Resposta do voltímetro (Volts)
57	0,28	220	5,48
65	0,29	225	5,75
70	0,31	230	6,05
75	0,32	235	6,26
80	0,36	240	6,40
85	0,40	245	6,68
90	0,45	250	6,85
95	0,54	255	7,07
100	0,62	260	7,22
105	0,74	265	7,40
110	0,83	270	7,58
115	0,96	275	7,73
120	1,09	280	7,91
125	1,21	285	8,04
130	1,42	290	8,18
135	1,58	295	8,29
140	1,72	300	8,49
145	1,91	305	8,55
150	2,11	310	8,65
155	2,34	315	8,75
160	2,51	320	8,82
165	2,79	330	9,00
170	3,02	340	9,14
175	3,28	350	9,22
180	3,42	360	9,32
185	3,89	370	9,39
190	4,01	380	9,44
195	4,28	390	9,49
200	4,48	400	9,53
205	4,67		
210	5,02		
215	5,28		

GRAFICO 5.3 — CURVA DE CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO



O erro estimado na calibração do transdutor foi de  $\pm 3,5 \mu\text{m}$ .

A fig. 5.3.4 mostra como foi feito o posicionamento do transdutor para executar as medidas da separação entre o munhão e a folha. Todas as medidas foram feitas com o eixo parado (sem girar). Como o eixo tem possibilidade de se mover em relação à estrutura do banco de testes, devido à baixa rigidez dos mancais, foi necessário fixar o transdutor ao eixo, para que este pudesse servir de referência para a medida da separação das folhas. Uma luva (1) presa ao eixo (2) sustenta uma barra chata dobrada (3) que serve de suporte para o transdutor (4). O transdutor é colocado com a ponta da lingueta (5) em contato com o centro de uma das folhas do mancal radial inferior (6). Um parafuso (7) permite mover a barra (3) aproximando ou afastando o transdutor da folha, possibilitando um ajuste fino do ponto de partida das medidas.

#### 5.4 - Medida da Pressão de Alimentação dos Mancais

A pressão de ar fornecida aos mancais foi medida diretamente pelos manômetros instalados junto às válvulas reguladoras de pressão, referidas no capítulo III. Foi utilizado um manômetro para os dois mancais radiais e um para o mancal de escora.

Os manômetros são marca "Famabras", com escala de 0 a  $11 \text{ Kgf/cm}^2$  (os valores da pressão serão sempre referentes à pressão manométrica, salvo indicação explícita em contrário). Não há nenhuma indicação nos manômetros quanto à precisão, que foi estimada em  $\pm 5 \%$ .

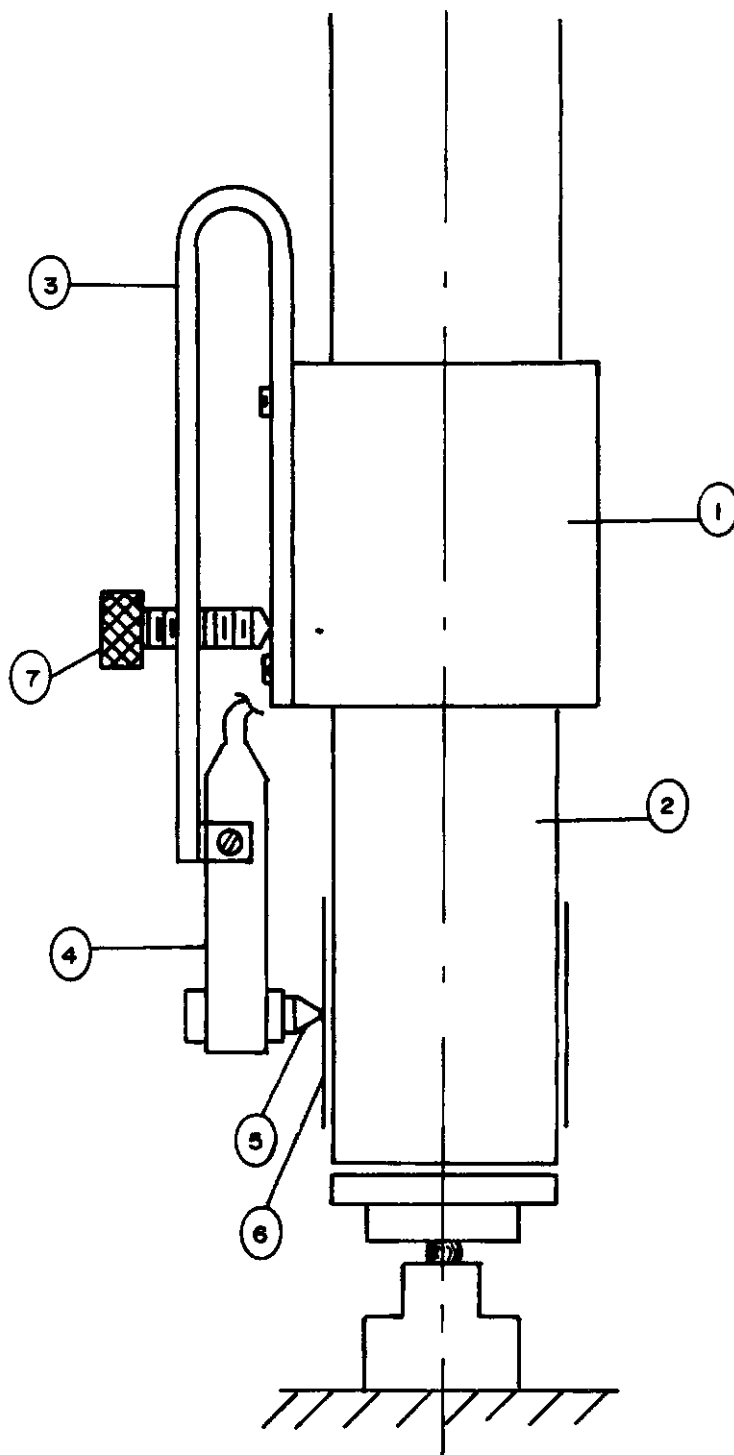


FIG. 5.3.4. - POSICIONAMENTO DO TRANSDUTOR

### 5.5 - Medida da Tensão nos Tirantes

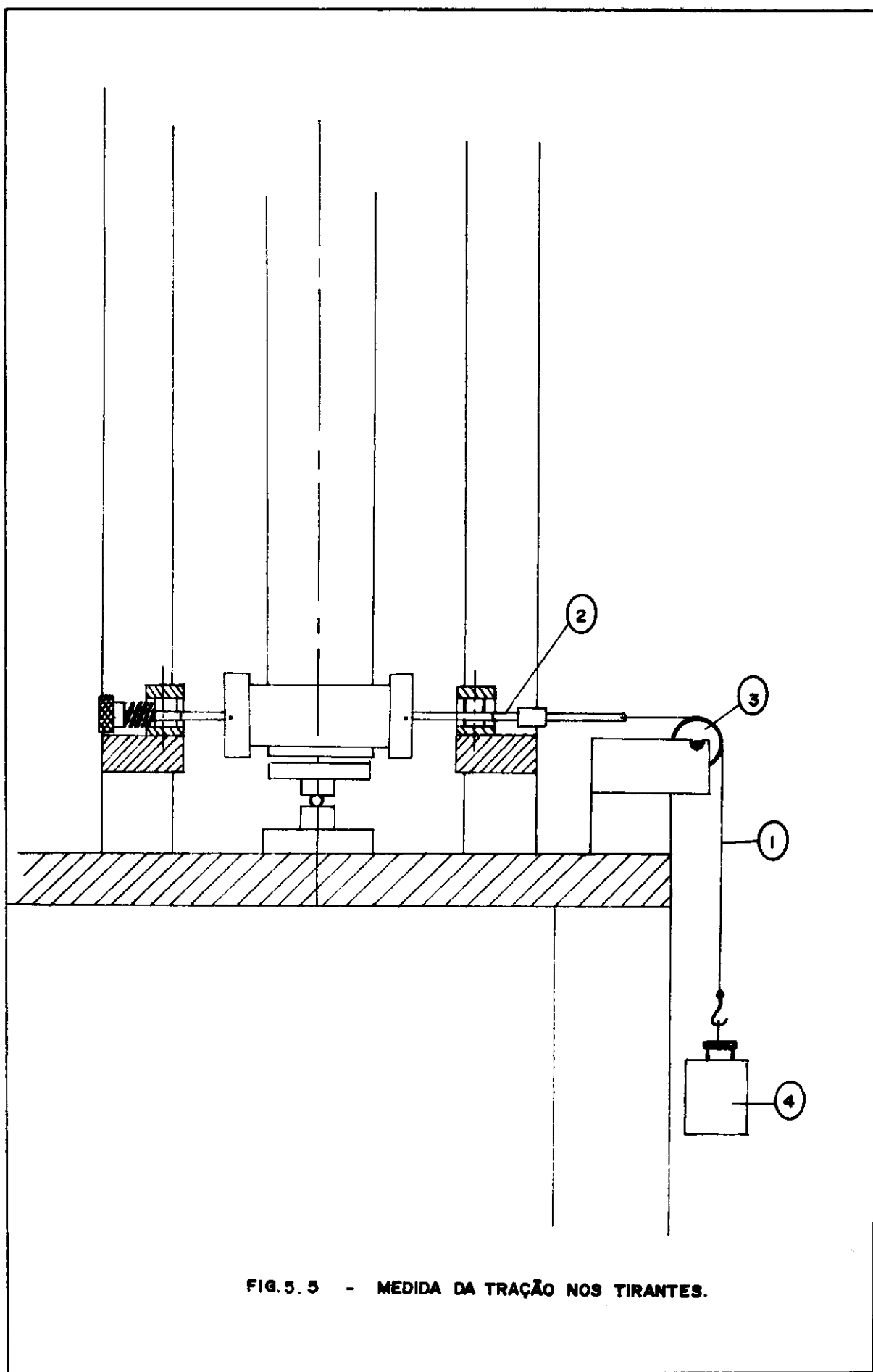
Durante a medição da separação entre as folhas e o munhão, a mola de um dos tirantes do mancal radial inferior foi retirada e o tirante foi tracionado por intermédio do dispositivo, mostrado na fig. 5.5 . O cabo (1) é preso ao tirante (2), passa pela roldana (3) e é tracionado pelo peso conhecido (4).

Pela geometria do mancal (os tirantes são espaçados de  $120^\circ$  em torno do eixo do mancal) a tensão será a mesma em todos os tirantes.

### 5.6 - Medida da Rigidez do Mancal

Para medir a rigidez do mancal de folha, foi utilizado o dispositivo mostrado na figura 5.6.1 .

Um cabo (1) envolve o eixo (2) logo acima do mancal radial inferior (3), passa pela roldana (4) e é tracionado pelo peso (P). O deslocamento do eixo é medido pelo relógio comparador (5) que é solidário com a mesa (6) e cuja ponteira se apoia no eixo do lado oposto à aplicação da força. O peso P pode ser variado medindo-se o deslocamento do eixo em função da força aplicada. A fig. 5.6.2. mostra a posição da força aplicada em relação ao mancal radial inferior.



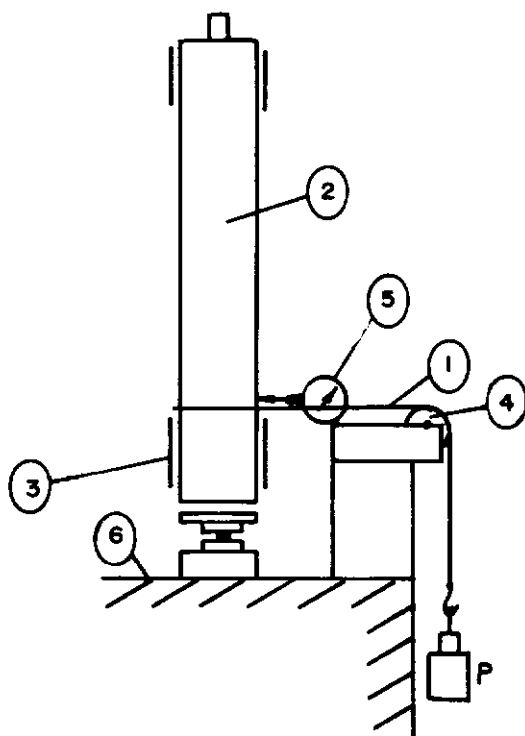


FIG. 5.6.1. - DISPOSITIVO PARA MEDIDA DA RIGIDEZ

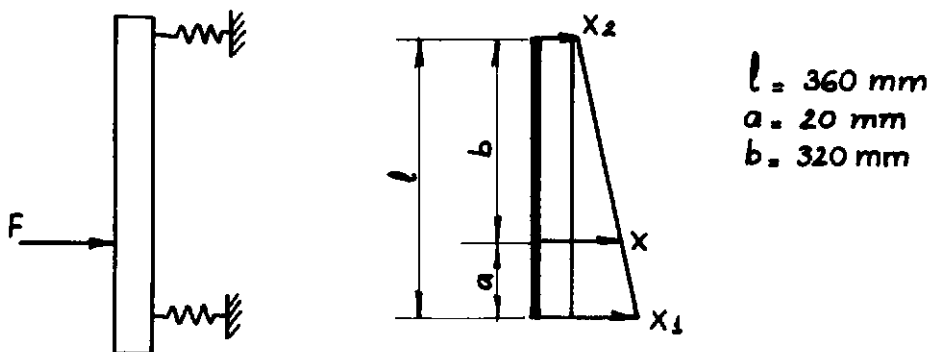
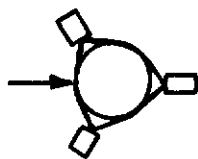


FIG. 5.6.2 - POSIÇÃO DA FORÇA APLICADA EM RELAÇÃO AOS MANCAIS.

## CAPÍTULO VI

## DESCRIÇÃO DOS TESTES

## 6.1 - Funcionamento

O primeiro teste a que o mancal foi submetido visou verificar se era possível girar o eixo tal como foi montado, a velocidades relativamente elevadas, isto é, velocidades próximas à máxima velocidade permitida pelo motor de acionamento.

Foi necessário encontrar um ajuste adequado dos tirantes dos dois mancais radiais, de modo que se obtivesse o melhor alinhamento possível entre o eixo de aço e o eixo do motor de acionamento. Todo o desalinhamento tem que ser absorvido pela peça intermediária de conexão entre o motor e o eixo, e se o desalinhamento for muito grande, o acionamento passa a ser desigual, gerando uma excitação transversal. Depois de conseguido o alinhamento, o acionamento se tornou suave.

Ao acelerar o eixo entre 0 e 2000 rpm, este passa por faixas de instabilidade. Foi necessário usar dispositivos que introduzissem atrito no movimento dos tirantes, de modo a aumentar o amortecimento durante a passagem por estas faixas de instabilidade.

Após ultrapassar a velocidade de 2000 rpm, o eixo se manteve estável e pôde ser acelerado sem problemas até a máxima velocidade alcançada que foi de 16.200 rpm.

As tabelas 6.1.1 e 6.1.2 mostram as condições em que foram realizados dois testes, o primeiro com duração de cerca de



TABELA 6.1.1

## TESTE DE FUNCIONAMENTO

Duração: aprox. 1 hora

Pressão no mancal de escora (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Pressão nos mancais radiais (Kgf / cm <sup>2</sup> )	Pressão no motor (Kgf/cm <sup>2</sup> )	RPM
4,0	4,5	1,0	4000
4,0	4,5	2,0	5500
4,0	4,5	2,5	6000
4,0	4,5	3,0	13500
4,0	4,5	3,5	14800
4,0	4,5	4,0	15500
4,0	4,5	4,5	16200

TABELA 6.1.2

TESTE DE FUNCIONAMENTO  
Duração : aprox. 2 horas

Pressão no mancal de escora (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Pressão nos mancais radiais (Kgf / cm <sup>2</sup> )	Pressão no motor (Kgf/cm <sup>2</sup> )	RPM	Contato (volts) (100 % = 5V)
4,0	3,0	0,8	8400	2,5
4,0	3,0	1,0	9300	0
4,2	3,5	1,0	9400	0
4,5	3,5	1,3	10500	0
5,0	3,5	1,5	11100	0
5,5	3,5	1,8	12200	0
5,5	3,5	2,0	12950	0
5,5	4,0	2,0	13000	0
5,5	3,0	2,0	13050	0
5,5	3,0	2,3	14250	0
5,5	3,0	2,5	14650	0
5,5	3,0	2,8	15350	0

1 hora e o segundo com duração de cerca de 2 horas. A duração desses testes e a máxima velocidade atingida foi limitada pelas características do sistema de alimentação de ar comprimido.

## 6.2 - Separação entre as Folhas e o Munhão

A separação entre uma das folhas do mancal inferior e o munhão foi medida para vários valores da tensão nos tirantes e para vários valores da pressão de alimentação. Estas medidas foram realizadas após o eixo ter sido colocado a girar por um período total de cerca de três horas, a velocidades superiores a 4000 rpm. Isto possibilitou uma acomodação das folhas dos mancais radiais.

As medidas da separação foram realizadas no centro da região de "contato" de uma das folhas do mancal inferior.

O equipamento utilizado para a execução destas medidas está descrito no parágrafo 5.3 .

O procedimento empregado para se efetuar as medidas foi o descrito a seguir :

Primeiro a mola de um dos tirantes do mancal inferior foi retirada e o tirante tracionado por uma força conhecida da maneira descrita no parágrafo 5.5, iniciando-se os testes com uma força de 2 Kgf. A seguir o mancal de escora foi pressurizado com  $4 \text{ Kgf/cm}^2$ . O eixo foi então travado para evitar qualquer movimento de rotação e o transdutor ajustado à posição com a lingueta em contato com a folha no centro da região de "contato" e de forma que a resposta do voltímetro apresentasse um valor correspondente ao início da curva de calibração do transdutor mos

trada no gráfico 5.3 (cerca de 2,8 volts).

As medidas da separação foram tomadas abrindo-se gradualmente a válvula reguladora de pressão e registrando-se a resposta do voltímetro a cada acréscimo de  $0,5 \text{ Kgf/cm}^2$  da pressão de alimentação do mancal. Antes de se efetuar esta medida, foi feita a verificação da conservação do "zero", ou seja, se após elevar a pressão até cerca de  $5 \text{ Kgf/cm}^2$  e em seguida despressurizar o mancal, se o voltímetro continua registrando a mesma resposta que apresentava antes da pressurização.

A medida da separação foi repetida três vezes para cada valor da tração nos tirantes. Os valores obtidos são mostrados na tabela 6.2.1.

O gráfico 6.2.1. mostra a curva obtida plotando-se os pontos obtidos em uma operação de pressurizar e despressurizar o mancal. Pode-se observar que há uma certa histerese, com a folha apresentando maiores valores de deslocamento (separação maior) durante a despressurização.

Os valores médios para cada valor da pressão de alimentação foram plotados em um gráfico, obtendo-se as curvas mostradas no gráfico 6.2.2.

A dispersão dos valores em torno dos pontos mostrados neste gráfico apresenta um desvio padrão máximo de  $5,06 \text{ }\mu\text{m}$ .

### 6.3 - Contato entre as Folhas e os Munhões

A existência ou não de contato entre as folhas e os munhões foi testada em uma experiência feita nas condições descritas na tabela 6.1.2. Durante este teste a tração nos tirantes

TABELA 6.2.1

## MEDIDAS DA SEPARAÇÃO

$P_0$  = Pressão de alimentação em  $\text{Kgf/cm}^2$

$V_1, 2, 3$  = Resposta do transdutor em Volts

$\bar{V}$  = Média das respostas  $V_1, V_2$  e  $V_3$  em Volts

$h^*$  = Valor da separação média convertido de  $\bar{V}$  pela curva de calibração do transdutor, em microns

T = Tração nos tirantes em Kgf

T = 2,0						T = 2,5				
$P_0$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$\bar{V}$	$h^*$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$\bar{V}$	$h^*$
0	2,81	2,83	2,86	2,83	0	2,83	2,83	2,83	2,83	0
0,5	3,24	3,31	3,33	3,29	10	3,16	3,17	3,16	3,16	7
1,0	3,81	3,89	3,90	3,87	21	3,74	3,72	3,69	3,72	18
1,5	4,30	4,39	4,36	4,35	30	4,20	4,18	4,20	4,19	27
2,0	4,73	4,78	4,75	4,75	38	4,61	4,57	4,59	4,59	35
2,5	5,19	5,22	5,17	5,19	46	4,99	5,03	4,99	5,00	43
3,0	5,48	5,51	5,50	5,50	52	5,31	5,28	5,29	5,29	48
3,5	5,83	5,85	5,84	5,84	59	5,64	5,61	5,58	5,61	54
4,0	6,06	6,10	6,10	6,09	64	5,87	5,86	5,84	5,86	59
4,5	6,32	6,34	6,33	6,33	69	6,09	6,10	6,07	6,09	64
5,0	6,52	6,54	6,52	6,53	74	6,27	6,25	6,25	6,26	67
4,5	6,36	6,38	6,37	6,37	71	6,13	6,10	6,10	6,11	64
4,0	6,20	6,22	6,21	6,21	66	5,96	5,95	5,95	5,95	61
3,5	6,02	6,05	6,06	6,04	63	5,80	5,79	5,78	5,79	58
3,0	5,72	5,73	5,74	5,73	57	5,51	5,50	5,50	5,50	52
2,5	5,37	5,40	5,38	5,38	50	5,24	5,21	5,19	5,21	47
2,0	5,06	5,08	5,07	5,07	44	4,99	4,93	4,92	4,95	42
1,5	4,70	4,71	4,73	4,71	37	4,59	4,55	4,55	4,56	34
1,0	4,31	4,33	4,32	4,32	30	4,21	4,15	4,18	4,18	27
0,5	3,76	3,75	3,77	3,76	19	3,65	3,61	3,58	3,61	16
0	2,84	2,86	2,85	2,85	1	2,83	2,83	2,83	2,83	0

TABELA 6.2.1.

(continuação)

T = 3,0						T = 3,5				
P <sub>0</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	$\bar{V}$	h*	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	$\bar{V}$	h*
0	2,81	2,84	2,84	2,83	0	2,84	2,85	2,86	2,85	0
0,5	2,99	2,88	2,90	2,92	2	2,90	2,90	2,92	2,91	1
1,0	3,58	3,51	3,50	3,53	14	3,48	3,36	3,37	3,40	11
1,5	4,04	4,00	4,00	4,01	24	3,93	3,87	3,86	3,89	20
2,0	4,48	4,43	4,40	4,44	32	4,36	4,30	4,29	4,32	29
2,5	4,85	4,86	4,83	4,85	40	4,73	4,67	4,62	4,67	35
3,0	5,19	5,14	5,13	5,15	46	5,07	5,02	5,02	5,04	42
3,5	5,49	5,47	5,44	5,47	52	5,36	5,37	5,35	5,36	49
4,0	5,72	5,69	5,67	5,69	56	5,57	5,56	5,55	5,56	52
4,5	5,94	5,94	5,90	5,93	61	5,79	5,78	5,76	5,78	57
5,0	6,11	6,10	6,10	6,10	64	5,96	5,96	5,95	5,96	60
4,5	5,99	5,97	5,96	5,97	61	5,82	5,82	5,80	5,81	57
4,0	5,82	5,80	5,79	5,80	58	5,67	5,66	5,65	5,66	54
3,5	5,68	5,62	5,60	5,63	55	5,48	5,48	5,48	5,48	51
3,0	5,38	5,37	5,35	5,37	50	5,22	5,24	5,21	5,22	46
2,5	5,07	5,06	5,07	5,07	44	4,96	4,97	4,96	4,96	41
2,0	4,75	4,79	4,73	4,76	38	4,64	4,65	4,64	4,64	35
1,5	4,40	4,35	4,37	4,37	30	4,26	4,26	4,26	4,26	27
1,0	3,96	3,98	3,96	3,97	23	3,80	3,87	3,77	3,81	19
0	2,84	2,84	2,84	2,84	1	2,86	2,86	2,86	2,86	0

TABELA 6.2.1.  
(continuação)

T = 4,0						T = 4,5					
P <sub>0</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	$\bar{V}$	h*	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	$\bar{V}$	h*	
0	2,86	2,88	2,88	2,87	0	2,89	2,92	2,91	2,91	0	
0,5	2,92	2,93	2,92	2,92	1	2,94	2,97	2,95	2,95	1	
1,0	3,31	3,26	3,24	3,27	8	3,25	3,16	3,17	3,19	6	
1,5	3,84	3,76	3,74	3,78	18	3,76	3,70	3,63	3,70	16	
2,0	4,25	4,19	4,17	4,20	26	4,17	4,12	4,09	4,13	24	
2,5	4,63	4,61	4,59	4,61	34	4,61	4,57	4,53	4,57	32	
3,0	4,97	4,93	4,93	4,94	40	4,93	4,88	4,87	4,89	39	
3,5	5,29	5,23	5,28	5,27	47	5,23	5,18	5,20	5,20	45	
4,0	5,52	5,51	5,48	5,50	51	5,49	5,45	5,43	5,46	50	
4,5	5,71	5,66	5,69	5,69	55	5,65	5,61	5,64	5,63	53	
5,0	5,86	5,86	5,84	5,85	58	5,80	5,75	5,75	5,77	56	
4,5	5,72	5,72	5,71	5,72	56	5,66	5,63	5,61	5,63	53	
4,0	5,56	5,55	5,56	5,56	52	5,47	5,46	5,48	5,47	50	
3,5	5,37	5,38	5,37	5,37	49	5,26	5,27	5,27	5,27	46	
3,0	5,13	5,12	5,15	5,13	44	5,01	5,02	5,02	5,02	41	
2,5	4,84	4,83	4,86	4,84	39	4,72	4,72	4,73	4,72	35	
2,0	4,51	4,50	4,54	4,52	32	4,39	4,38	4,39	4,39	29	
1,5	4,13	4,11	4,16	4,13	25	3,99	3,94	3,97	3,97	21	
1,0	3,71	3,69	3,71	3,70	17	3,53	3,53	3,54	3,53	12	
0,5	3,09	3,03	3,07	3,06	4	2,98	2,98	2,98	2,98	2	
0	2,88	2,88	2,89	2,88	1	2,91	2,91	2,91	2,91	0	

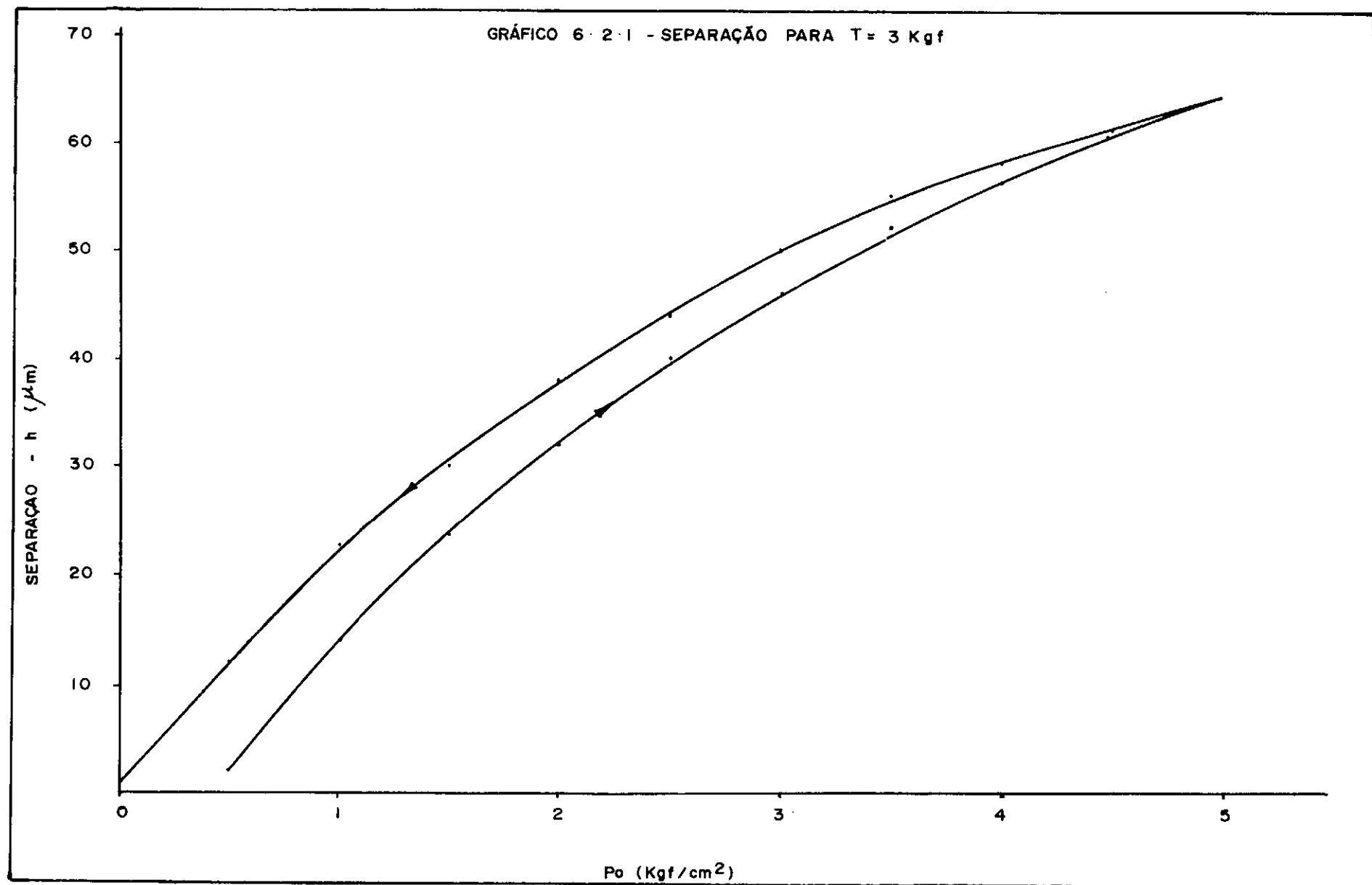
TABELA 6.2.1  
(continuação)

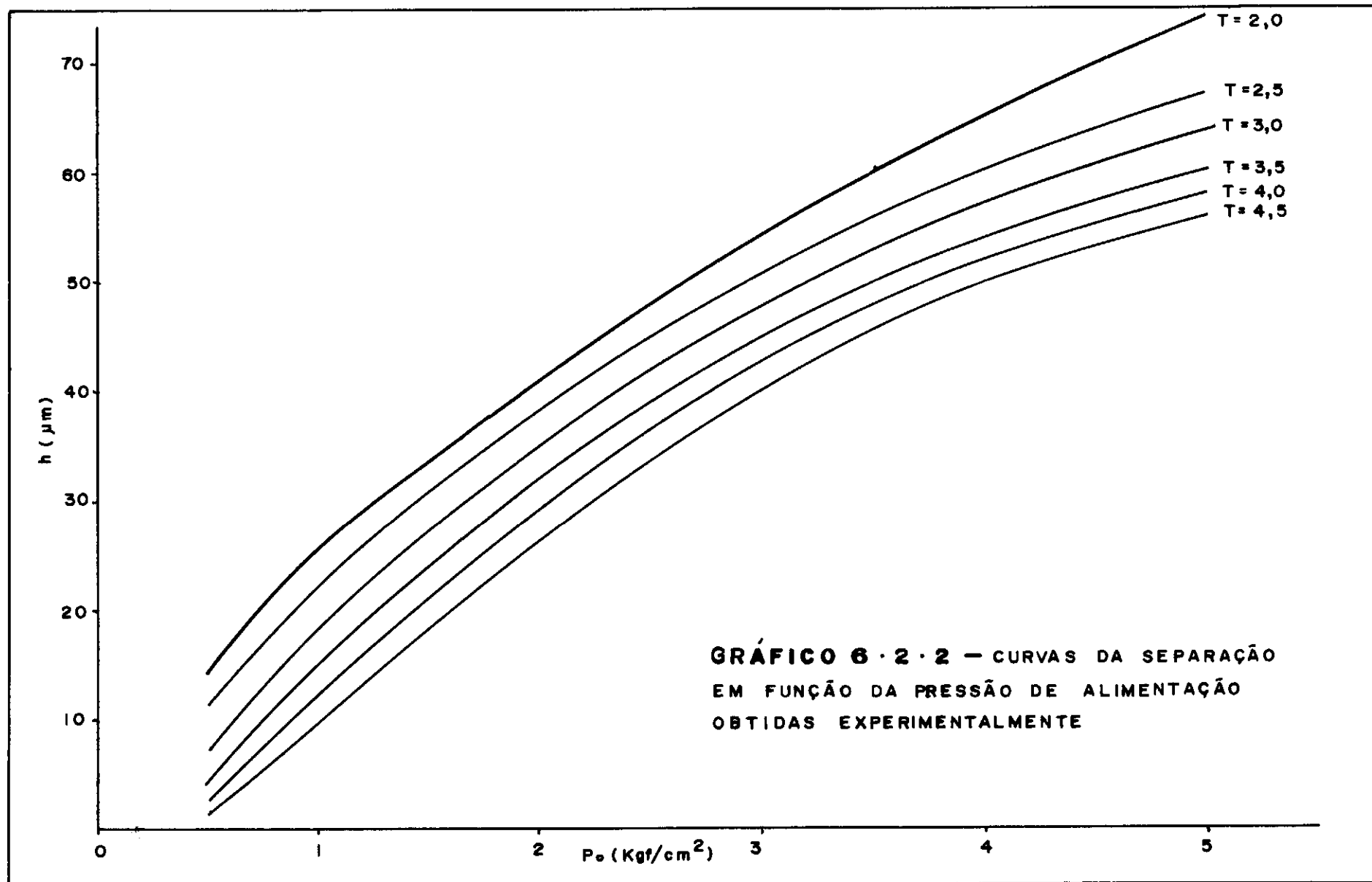
## RESUMO

$h$  = média dos valores de  $h^*$  para pressão crescente e decrescente

$P_0$	$T = 2,0$	$T = 2,5$	$T = 3,0$	$T = 3,5$	$T = 4,0$	$T = 4,5$
0	0	0	0	0	0	0
0,5	14,5	11,5	7,0	4,5	2,5	1,5
1,0	25,5	22,5	18,5	15,0	12,5	9,0
1,5	33,5	30,5	27,0	23,5	21,5	18,5
2,0	41,0	38,5	35,0	32,5	29,0	26,5
2,5	48,0	45,0	42,0	38,0	36,5	33,5
3,0	54,5	50,5	48,0	44,0	42,0	40,0
3,5	61,0	56,0	53,5	50,0	48,0	45,5
4,0	65,0	60,0	57,0	53,0	51,5	50,0
4,5	70,0	64,0	61,0	57,0	55,5	53,0
5,0	74,0	67,0	64,0	60,0	58,0	56,0







do mancal inferior foi regulada em aproximadamente 3 Kgf. Isso foi feito utilizando os dados do gráfico 6.2.2, tomando-se o ponto correspondente a uma pressão de alimentação de  $3 \text{ Kgf/cm}^2$  na curva obtida para uma tração de 3 Kgf nos tirantes. Para esta curva, a separação é de  $48 \mu\text{m}$  no ponto correspondente a  $3 \text{ Kgf/cm}^2$ . Assim o mancal foi montado com a mola que havia sido retirada, e tensionado até se obter uma separação de  $48 \mu\text{m}$  para uma pressão de alimentação de  $3 \text{ Kgf/cm}^2$ .

A tabela 6.1.2 inicia-se com uma velocidade de 8400rpm porque foi esta a mínima velocidade estável conseguida, por limitação do motor, que não funciona com velocidade uniforme com pressões de alimentação abaixo de  $0,8 \text{ Kgf/cm}^2$ .

Todas as medidas do voltímetro do detector de contato registradas na tabela foram tomadas imediatamente após verificar se havia contato elétrico das lâminas do detector com o eixo (ver parágrafo 5.2), sendo sempre obtida a resposta de 5 Volts, que corresponde a contato total.

#### 6.4 - Rigidez do Mancal

A rigidez dos mancais radiais foi medida nas mesmas condições de tensionamento dos tirantes utilizadas para o teste de contato descrito no parágrafo 6.3. O mancal de escora foi pressurizado com  $4 \text{ Kgf/cm}^2$  e os mancais radiais com  $3 \text{ Kgf/cm}^2$ .

O teste foi feito aplicando-se uma força horizontal no eixo, logo acima do mancal radial inferior, com o dispositivo já descrito no parágrafo 5.6, e medindo-se o deslocamento correspondente. Diversos valores desta força foram obtidos pela colocação

de pesos conhecidos no dispositivo referido acima. Foram colocados pesos de 0,1 Kgf a 1,9 Kgf, variando em intervalos de 0,1Kgf. Após a aplicação de cada peso, e antes de se tomar o valor do deslocamento correspondente, alguma vibração foi imprimida ao sistema, para que este pudesse alcançar seu ponto de acomodação sob a ação da força aplicada, vencendo os atritos presentes. Todo o procedimento seguido neste teste foi adotado visando a reprodutibilidade dos resultados.

A tabela 6.4 mostra as forças aplicadas e os deslocamentos correspondentes registrados pelo relógio comparador. Estes valores foram marcados no gráfico 6.4 .

Devido ao fato de estas medidas terem sido feitas em um ponto intermediário do eixo, ainda que próximo ao mancal inferior, é necessário introduzir uma correção para se chegar aos valores relativos ao mancal. A terceira coluna da tabela 6.4 mostra os valores corrigidos do deslocamento em função da força para o mancal inferior.

Esta correção foi feita considerando-se que o deslocamento no mancal será o deslocamento no ponto de aplicação da força multiplicado por um coeficiente constante  $c$ . Assim, se o deslocamento no ponto de aplicação da força é  $x = f(F)$ , o deslocamento no mancal será  $x_1 = cf(F)$ . Este coeficiente é calculado levando em conta a geometria do sistema mostrada na figura 5.6.2. Considerando-se que o eixo não se deforma, os deslocamentos nos mancais inferior ( $x_1$ ), superior ( $x_2$ ) e no ponto de aplicação da força ( $x$ ) relacionam-se pela expressão :

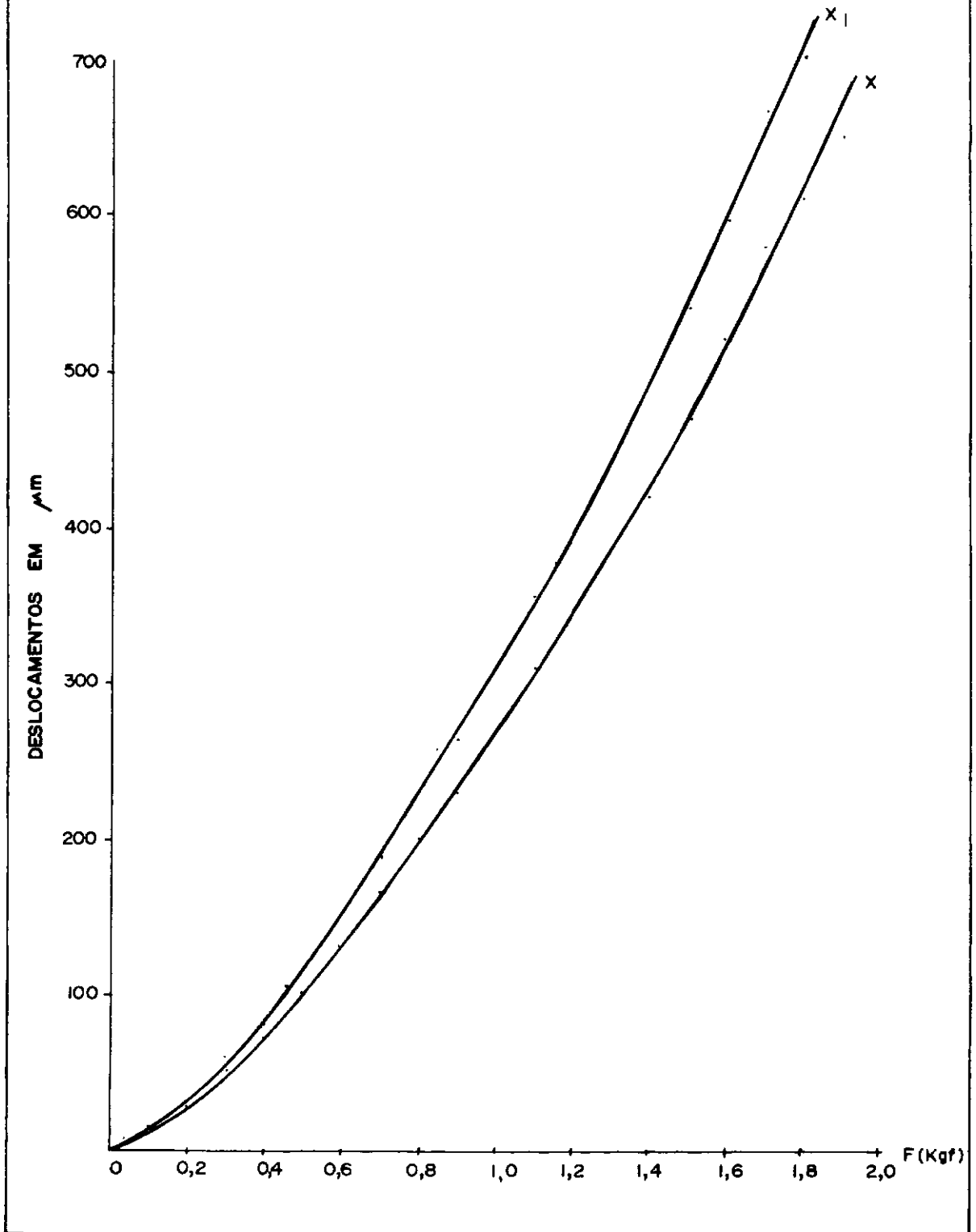
$$x = \frac{b}{\ell} x_1 + \frac{a}{\ell} x_2 \quad (6.4.1)$$

TABELA 6.4

## RIGIDEZ DO MANCAL

F: (Força aplicada ao eixo) (Kgf)	$x = f(F)$ (Deslocamento medido no ponto de aplicação) ( $\mu\text{m}$ )	$x_1 = c f(F)$ (Deslocamento corrigido, relativo ao mancal <u>in</u> ferior) ( $\mu\text{m}$ )
0	0	0
0,1	10	11,5
0,2	25	28,7
0,3	50	57
0,4	70	80
0,5	100	115
0,6	130	149
0,7	165	189
0,8	200	230
0,9	230	264
1,0	270	310
1,1	310	356
1,2	345	396
1,3	385	442
1,4	430	494
1,5	470	540
1,6	520	597
1,7	580	666
1,8	610	700
1,9	650	746

GRÁFICO 6.4 - DESLOCAMENTOS DO EIXO NO PONTO  
DE APLICAÇÃO DA FORÇA E NO  
MANCAL.



Escrevendo-se os deslocamentos em função das forças nos mancais inferior ( $F_1$ ), superior ( $F_2$ ) e no ponto onde foi medido o deslocamento ( $F$ ), e substituindo em (6.4.1), vem :

$$f(F) = \frac{b}{\ell} c f(F_1) + \frac{a}{\ell} c f(F_2) \quad (6.4.2)$$

$$\text{como } F_1 = \frac{b}{\ell} F$$

$$\text{e } F_2 = \frac{a}{\ell} F ,$$

vem :

$$f(F) = \frac{b}{\ell} c f \left( \frac{b}{\ell} F \right) + \frac{a}{\ell} c f \left( \frac{a}{\ell} F \right) \quad (6.4.3)$$

Substituindo em (6.4.3) os valores conhecidos de  $f(F)$ ,  $a$ ,  $b$  e  $\ell$ , podemos calcular  $c$  :

$$c = 1,148$$

O gráfico 6.4 mostra a curva relativa ao deslocamento no ponto de aplicação da força ( $x$ ) e a curva corrigida para o deslocamento no mancal em função da força no mancal ( $x_1$ ).

## CAPÍTULO VII

## CÁLCULO TEÓRICO DA SEPARAÇÃO

O tratamento analítico dos mancais de folha é bastante dificultado ao se levar em conta as propriedades elásticas da folha. A distribuição de pressões no filme de lubrificante produz deformações na folha flexível, o que, por sua vez, altera a distribuição de pressões. Vários autores estudaram o problema da conformação da folha em mancais desse tipo, tanto analiticamente <sup>3, 11, 12, 13</sup>, como experimentalmente <sup>14</sup>. A solução analítica do problema básico envolve a resolução de uma equação diferencial parcial não-linear de sexta ordem <sup>13</sup>. Por este motivo, todos os trabalhos adotam várias simplificações, em maior ou menor grau, na procura de uma solução para o problema. Walowit & Anno <sup>5</sup> ao apresentarem uma revisão das soluções analíticas para o caso do mancal hidrodinâmico (não pressurizado externamente), classifica os mancais de folha em duas categorias, conforme seja ou não levada em consideração a resistência à flexão da folha.

Licht <sup>4</sup> considera a separação como uniforme, exceto em pequenas regiões próximas às bordas das folhas para o caso de mancais onde o ângulo de abraçamento e a largura da folha não sejam muito pequenos.

No presente trabalho, o problema da flexibilidade da folha torna-se mais complexo devido à presença dos tubos soldados, o que aumenta a rigidez na direção axial e também na direção tangencial próximo aos tubos. O cálculo teórico aqui apresen



tado foi feito tendo-se em vista verificar a possibilidade de a valiar, em primeira aproximação, os parâmetros básicos do mancal, ou seja, a relação entre a capacidade de carga, a separação e a pressão de alimentação, através da teoria convencional para mancais rígidos, utilizada por Powel <sup>1</sup> e por Constantinescu <sup>15</sup> para o projeto de mancais pressurizados externamente.

### 7.1 - Hipóteses adotadas

Para a aplicação do método citado, cada região de "contato" do mancal de folha foi considerada como uma sapata rígida com injeção de ar através dos seis furos. Esta hipótese implica desde logo em desprezar as deformações da folha na região de contato e considerar uniforme a separação em toda a área de cada "sapata". Esta hipótese parece aceitável em face da maior espessura da folha e da presença dos tubos soldados.

Além desta, foram feitas as seguintes suposições:

#### - Alimentação :

O fluxo de ar injetado através de cada série de três furos é tratado como se fosse feito por um rasgo na direção a-xial, abrangendo os três furos, e com área equivalente à soma das áreas de alimentação relativas a cada um dos furos. (A área de alimentação relativa a um orifício é dada pela expressão :

$$S = \Pi d h$$

onde d é o diâmetro de cada orifício e h a distância entre a fo

lha e o munhão.

- Fluxo de ar :

Na maioria dos casos práticos de mancais aerostáticos, o fluxo de gás, entre a casca e o munhão, é laminar, e as perdas de pressão ocorrem devido ao atrito viscoso no filme de gás. No tratamento simplificado do fluxo de lubrificante são geralmente adotadas as seguintes hipóteses <sup>1</sup>:

a) As forças de inércia são desprezíveis em presença das forças de fricção devidas ao atrito viscoso;

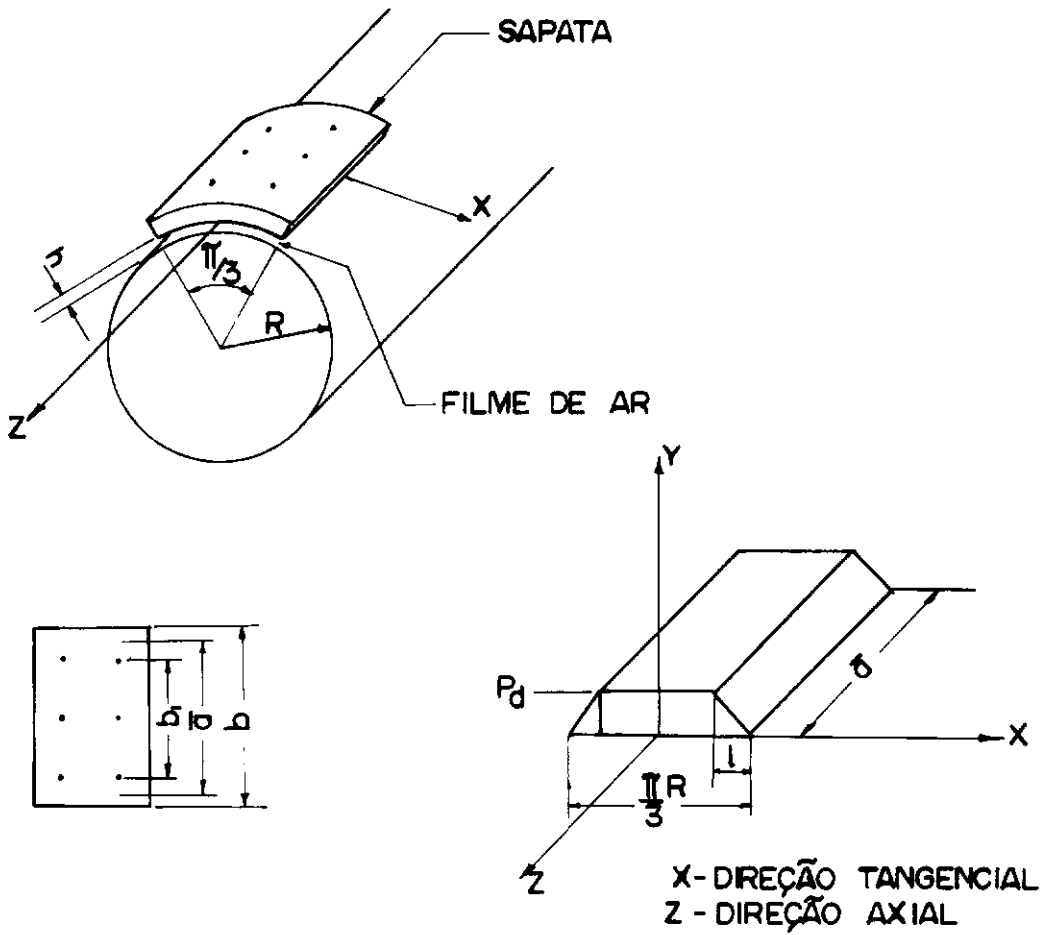
b) O fluxo é laminar em todos os pontos do filme;

c) O escoamento é isotérmico

Além disso, o escoamento pode ser considerado tridimensional ou bidimensional. O tratamento mais simplificado considera o escoamento bidimensional, e é o adotado aqui. Segundo esta hipótese, o escoamento se dá unicamente na direção tangencial. Para levar em conta o escapamento na direção axial, é feita uma correção no comprimento da sapata <sup>8</sup> conforme mostrado na figura 7.1.1 .

- Distribuição de pressões :

Supõe-se a distribuição de pressões com o perfil mostrado na figura 7.1.1 . Entre as duas carreiras de furos, a pressão é considerada constante ( $P_d$ ) e decai para as bordas linearmente, na direção do fluxo <sup>15</sup>. Estas hipóteses sobre a distribuição de pressões são feitas em face da grande dificuldade de se medir pressões no filme de lubrificante.



$\bar{a}$  = COMPRIMENTO DO RASGO EQUIVALENTE  
AOS TRÊS FUROS

$$\bar{a} = \frac{b + b_1}{2}$$

FIG. 7.1.1 - DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES NO FILME DE AR

## 7.2 - Relação entre a distribuição de pressões e a tração nos ti rantes

Observando a geometria do mancal, podemos verificar (ver fig. 7.2.1) que em uma situação de equilíbrio, a tração deve ser a mesma nos três tirantes, devido unicamente ao fato de eles for  
marem entre si um ângulo de 120°.

Além disso, o comprimento livre de cada folha é tal que cada região de "contato" abrange um ângulo de 60° em torno do ei  
xo do mancal, sendo as três regiões de contato igualmente espaça  
das entre si. Daí decorre que a tração em cada folha tem que ser igual à tração nos tirantes, pois no ponto em que as folhas se unem, elas formam entre si, e com a direção do tirante, ângulos iguais, de 120°.

Disso decorre que, em cada região de "contato", a resul  
tante das forças geradas pela pressão no filme de ar deve também ser igual ao mesmo valor de T da tração nos tirantes para promo  
ver o equilíbrio das forças que agem sobre cada folha.

Integrando as forças de pressão ao longo de uma região de "contato" :

$$T = 2 \int_0^{\pi/6} P(\theta) \cos\theta \, \bar{a} d\theta$$

onde :

T = tração nos tirantes

P(θ) = diferença entre a pressão no filme e a pressão atmosférica em função do ângulo (ver fig. 7.2.1)

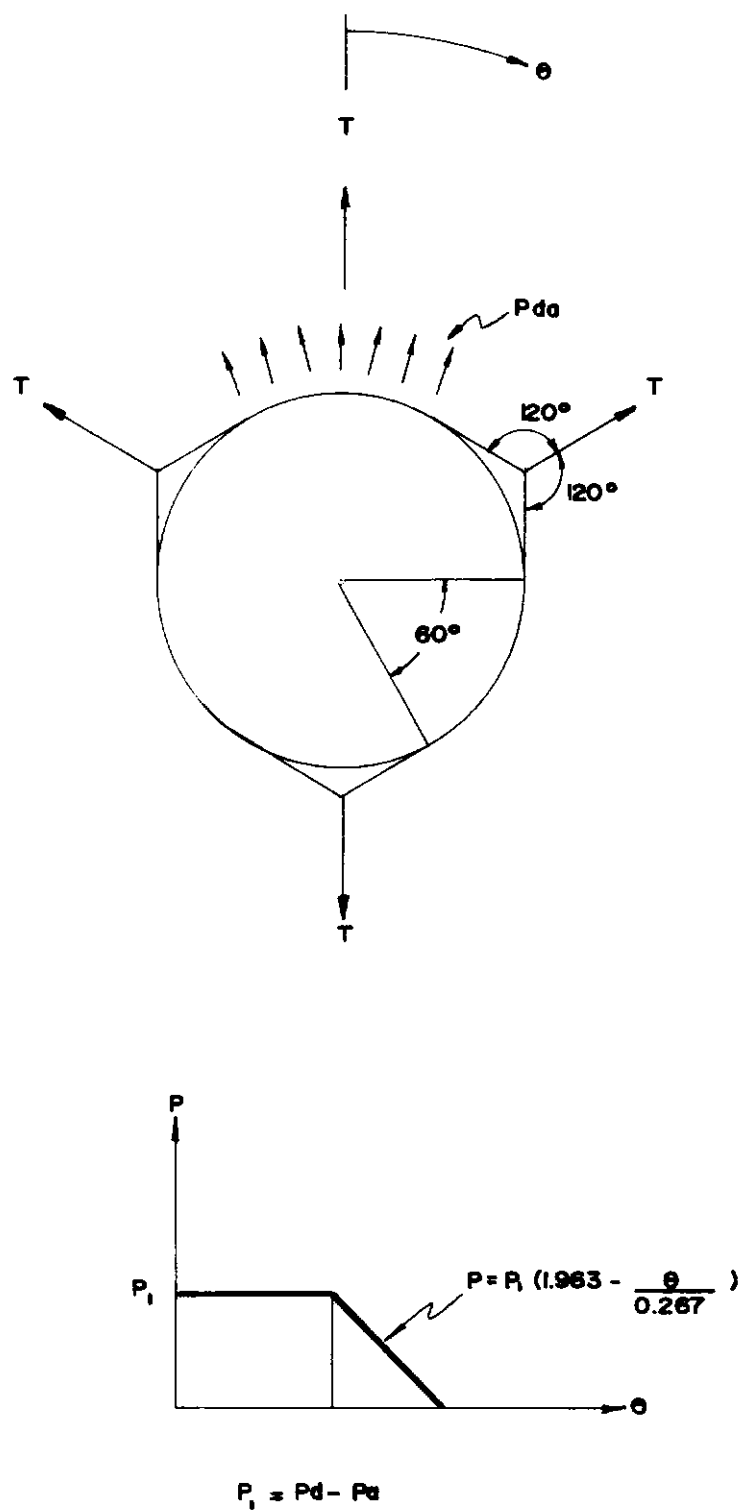


FIG. 7.2.1 - DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS E PRESSÕES NO MANCAL

Substituindo  $P(\theta)$  por sua expressão analítica e integrando vem:

$$T = 0,735 \times 10^{-3} (P_d - P_a)$$

onde :

$P_a$  = Pressão atmosférica

tirando o valor de  $P_d$ , vem :

$$P_d = 1,361 \times 10^3 T + P_a \quad (7.2.1)$$

( $P_d$  = Pressão no filme logo após o orifício de injeção)

### 7.3 - Fluxo de gás

O fluxo de gás é tratado por Powel<sup>1</sup>, sob dois aspectos: primeiro considerando o fluxo entre duas placas paralelas e , em segundo lugar, considerando-se o fluxo através dos orifícios de injeção.

- Fluxo entre placas paralelas :

Considerando as hipóteses e simplificações mencionadas em 7.1 e a geometria mostrada na figura 7.3.1, tem-se a expressão que relaciona a distribuição de pressões, as propriedades do gás e a geometria das placas

$$P_d^2 - P_a^2 = \frac{24 \mu m R T_0 \ell}{\bar{a} h} \quad (7.3.1)$$

onde :

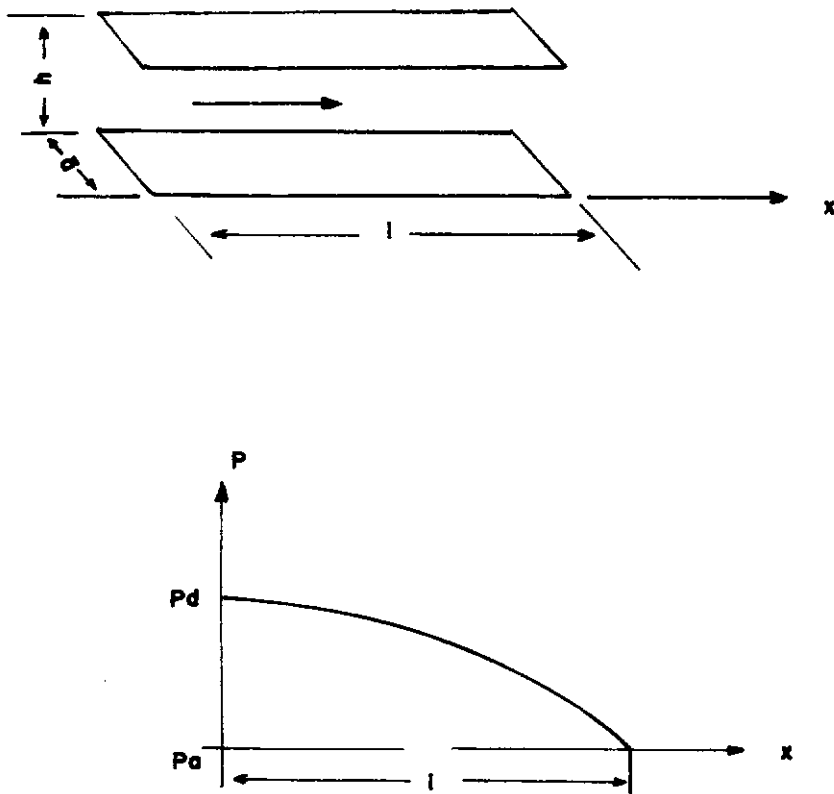


FIG. 7 .3.1 - FLUXO ENTRE PLACAS PARALELAS.

$\mu$  = viscosidade do ar ( $1,9 \times 10^{-5}$  Kg/m.s.)

$m$  = vazão do ar

$R$  = constante dos gases ( $287$  J/Kg $^{\circ}$ C)

$T_0$  = temperatura do ar ( $293^{\circ}$ K)

- Fluxo do gás através dos orifícios de injeção

$$m = C_D A \rho_0 (2RT_0)^{1/2} \left[ \left( \frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \left\{ \left( \frac{P_d}{P_0} \right)^{2/\gamma} - \left( \frac{P_d}{P_0} \right)^{\gamma+1/\gamma} \right\} \right]^{1/2}$$

onde :

$C_D$  = coeficiente de descarga ( $C_D = 0,8$  se  $\frac{P_d}{P_0} \leq 0,7$ )

$P_0$  = pressão na alimentação

$A$  = área total do orifício ou rasgo por onde é injetado o gás ( $A = 3\pi dh$ )

$\rho_0$  = densidade do ar

$$\left[ \frac{\gamma}{\gamma-1} \left\{ \left( \frac{P_d}{P_0} \right)^{2/\gamma} - \left( \frac{P_d}{P_0} \right)^{\gamma+1/\gamma} \right\} \right]^{1/2} = F_\gamma \left( \frac{P_d}{P_0} \right)$$



7.4 - Expressão da separação em função de  $P_0$ ,  $P_a$  e  $T$  :

Substituindo (7.3.2) em (7.3.1), e fazendo :

$$A = 3\pi d h$$

e

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0}$$

vem :

$$P_d^2 - P_a^2 = P_0 C_D 24 \mu (2RT_0)^{1/2} \cdot F_Y\left(\frac{P_d}{P_0}\right) \cdot \frac{23\pi d}{\bar{a}} \cdot \frac{1}{h^2} \quad (7.4.1)$$

Fazendo :

$$B = 24 \mu (2RT_0)^{1/2} \cdot P_0 \cdot C_D \cdot F_Y\left(\frac{P_d}{P_0}\right)$$

e

$$G = \frac{3\pi d \ell}{\bar{a}}$$

e tirando o valor de  $h^2$  em (7.4.1), vem :

$$h^2 = B \cdot G \cdot \frac{P_0}{P_d^2 - P_a^2} \quad (7.4.2)$$

Considerando os valores numéricos e  $F_Y\left(\frac{P_d}{P_0}\right) = 0,484$  se

$\frac{P_d}{P_0} \leq 0,53$  e  $C_D = 0,8$  se  $\frac{P_d}{P_0} \leq 0,7$ , e substituindo  $P_d = 1,361 \times 10^3 T P_a$

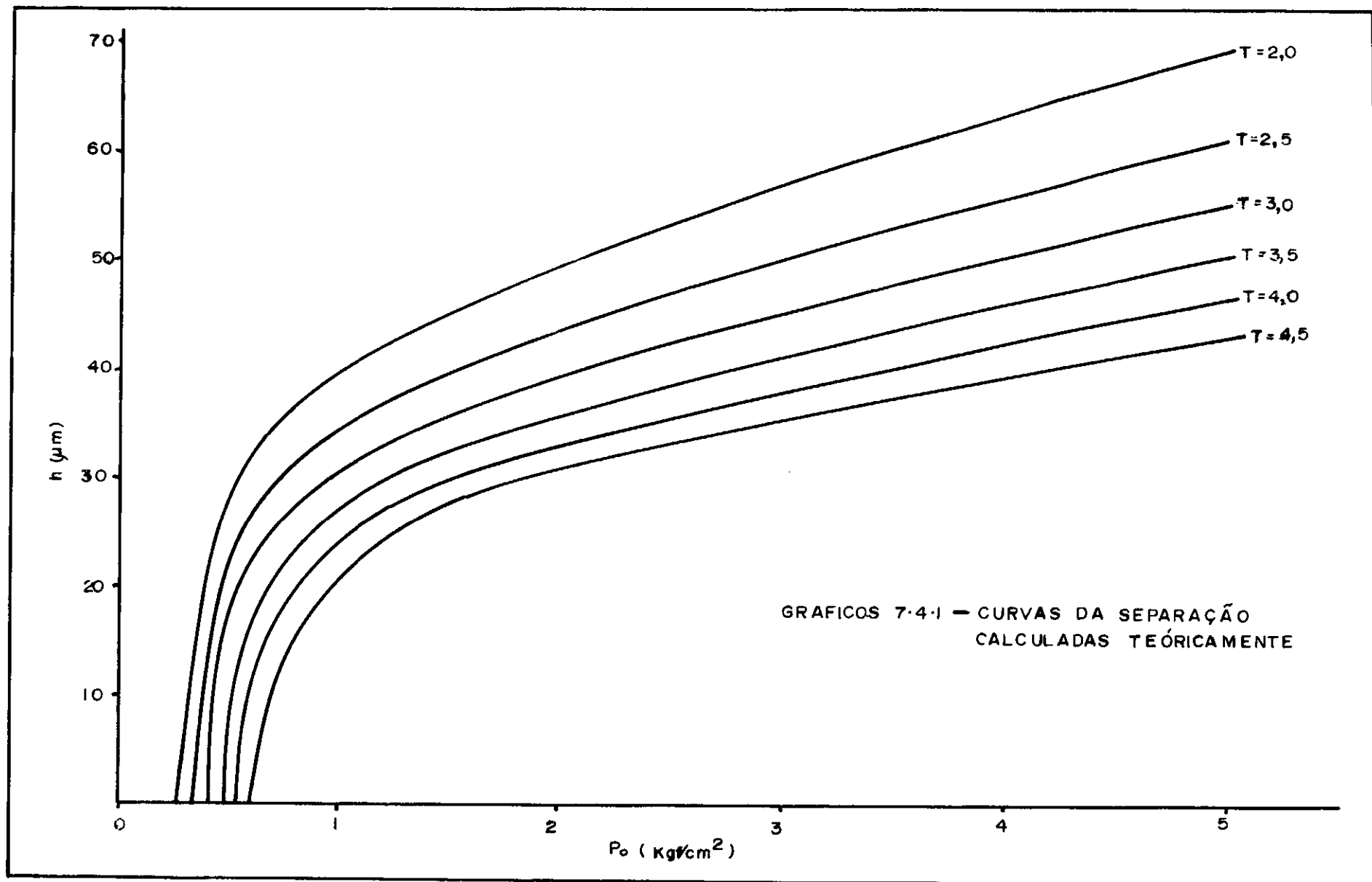
em (7.4.2) vem :

$$h = 5,216 \times 10^6 \sqrt{\frac{P_0}{T^2 + 1,47 \times 10^{-3} T P_a}} \quad (7.4.3)$$

Utilizando a expressão (7.4.3) pode-se traçar as curvas mostradas no gráfico 7.4.1, da separação em função da pressão de alimentação e da tração nos tirantes.

Para pressões de alimentação que tornem  $\frac{P_d}{P_0}$  inferior a

0,7 ou 0,53, é necessário corrigir a expressão (7.4.3) modificando os valores de  $F\gamma\left(\frac{P_d}{P_0}\right)$  e de  $C_D$  de acordo com os gráficos mostrados na figura 7.4.1



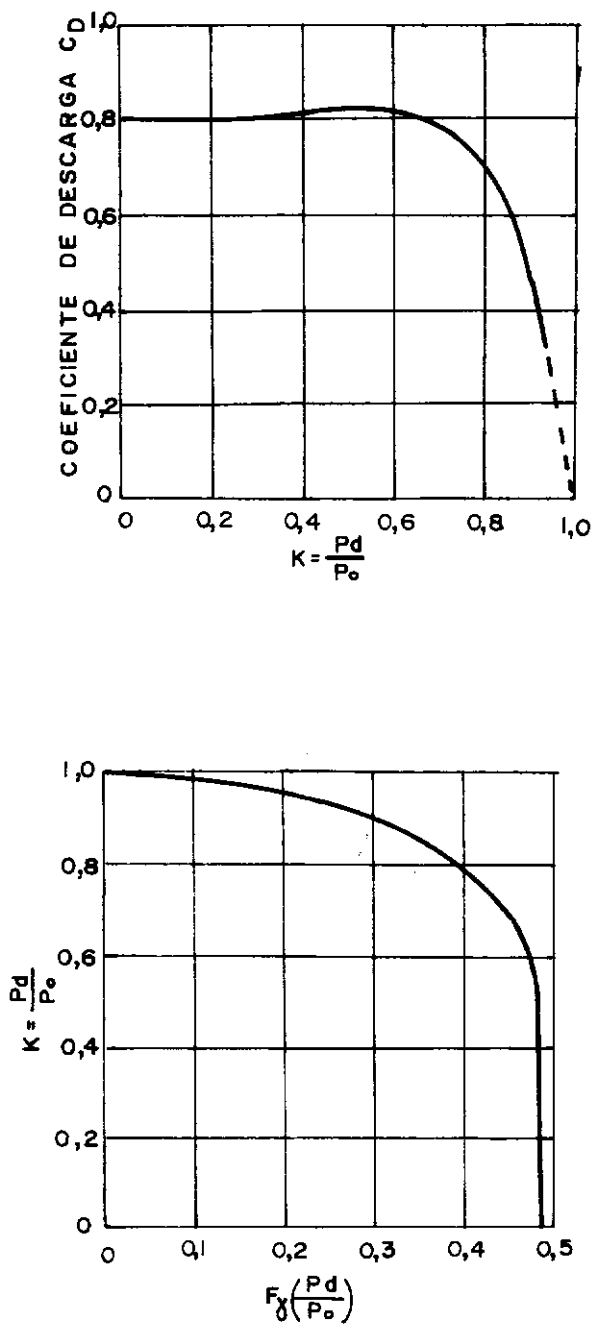


FIG. 7.4.1 - GRÁFICOS DE CORREÇÃO  
DE  $F_y$  E  $C_D$

## CAPÍTULO VIII

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

## 8.1 - Funcionamento

A observação do funcionamento do mancal mostra que é possível ultrapassar as faixas de instabilidade que aparecem entre 0 e 2000 rpm desde que se utilize um amortecimento adequado para o movimento dos tirantes. Pela própria construção do mancal, um amortecimento pode ser acrescentado facilmente, e independentemente das características do filme de lubrificante.

O teste registrado na tabela 6.1.1 mostrou que é possível acelerar o eixo sem problemas até uma velocidade de 16200rpm. Esta velocidade foi limitada pelo sistema de alimentação.

O teste registrado na tabela 6.1.2 foi realizado após o sistema ter sido operado por um tempo total de cerca de 2 horas. Isto propiciou uma certa acomodação das folhas, o que pode ser notado se compararmos as pressões fornecidas ao motor de acionamento e as velocidades atingidas, notando que no segundo teste as pressões são bem menores.

Verifica-se também na tabela 6.1.2 que a separação total entre os mancais e o eixo (ausência de contato) é conseguida para velocidades a partir de 9300 rpm, com o mancal inferior tração com 3 Kgf. Este teste teve a duração de cerca de 2 horas e a velocidade máxima atingida foi limitada pelas condições do sistema de alimentação de ar comprimido que acumula água nas tubulações, e não por limitações do mancal.

## 8.2 - Separação

A observação das curvas do gráfico 6.2.2, obtido experimentalmente, mostra que a partir de  $1 \text{ Kgf/cm}^2$  as curvas se apresentam uniformes, isto é, seguem aproximadamente paralelas para os diversos valores da tração.

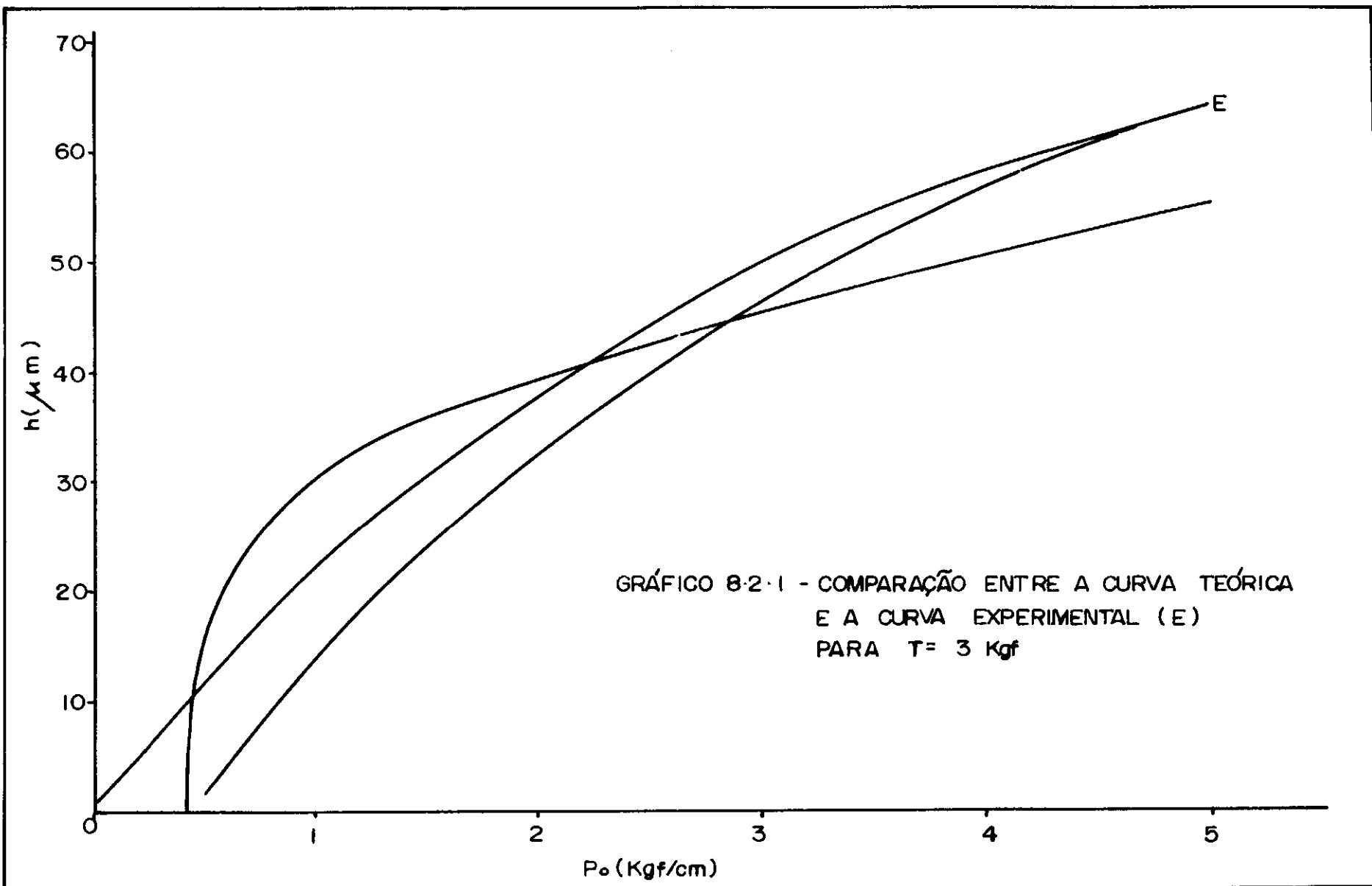
Observa-se também que para uma pressão intermediária, por exemplo  $3 \text{ Kgf/cm}^2$ , a separação se mantém entre 40 e 55  $\mu\text{m}$  para a tração nos tirantes variando entre 2 e 4,5 Kgf.

A inclinação das curvas é decrescente com a pressão.

A observação das curvas do gráfico 7.4.1, obtido pelo cálculo teórico, mostra que há um valor mínimo da pressão de alimentação para cada valor da tração abaixo do qual não há separação. A partir desse ponto as curvas são crescentes com grande inclinação no início, e esta inclinação diminui com a pressão de alimentação.

O gráfico 8.2.1 mostra uma comparação entre a curva teórica e a curva experimental para um valor intermediário da tração, de 3 Kgf. A curva experimental (E) foi traçada pelas médias das três medidas efetuadas para a pressurização e para a despressurização. Pode-se verificar que o maior desvio entre as duas curvas se dá na parte inicial, até  $1 \text{ Kgf/cm}^2$ , depois as curvas se cruzam em torno de  $3 \text{ Kgf/cm}^2$ , afastando-se depois novamente, porém menos que no início.

A comparação das curvas teóricas e experimentais mostra que o cálculo teórico aqui apresentado permite uma avaliação em primeira aproximação dos parâmetros do mancal, para pressões acima de  $1,5 \text{ Kgf/cm}^2$ .



### 8.3 - Rigidez

Observando o gráfico 6.4.1 pode-se notar que o deslocamento verificado no mancal não é linear com a força aplicada. Se definirmos a rigidez ( $k$ ) como a razão entre a força e o deslocamento, ou seja,

$$k = \frac{F}{x_1}$$

teremos uma rigidez maior para pequenos deslocamentos.

Computando os valores de  $k$  para o início e o fim da curva, teremos  $k$  variando entre

$$k_i = 7,3 \text{ Kgf/mm}$$

e

$$k_f = 2,5 \text{ Kgf/mm}$$

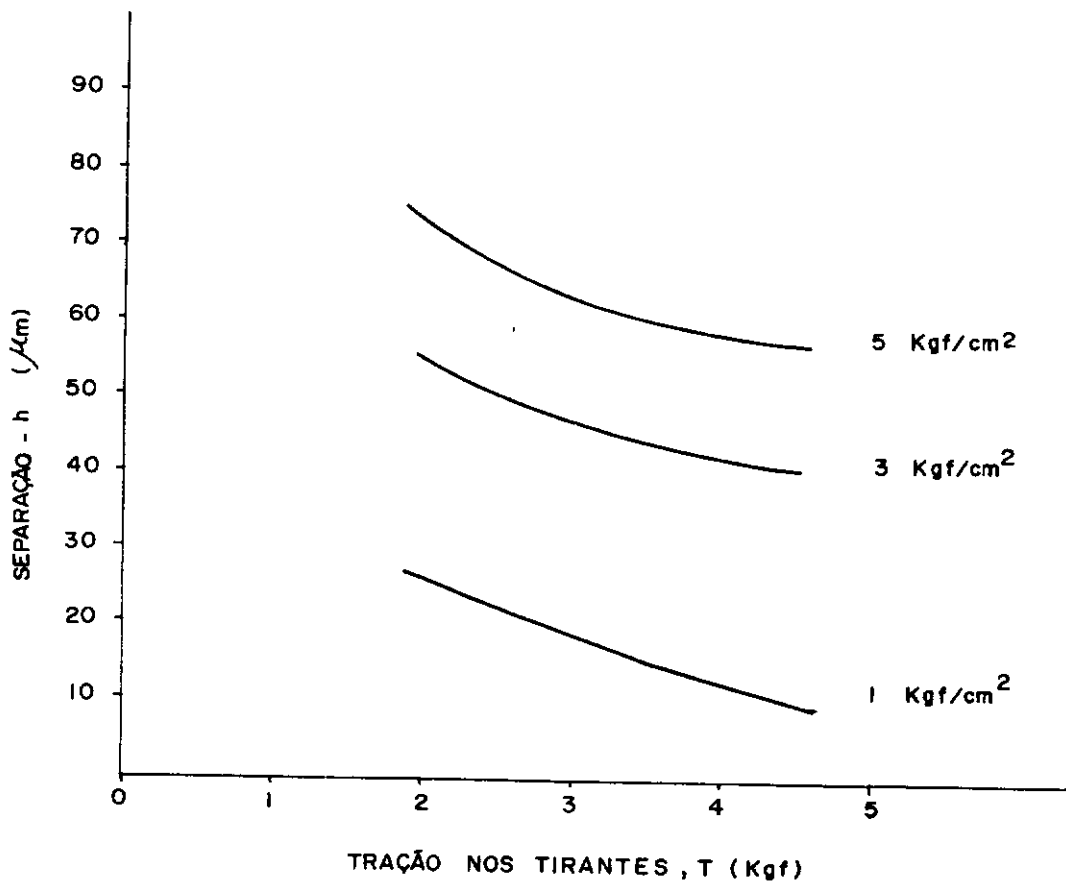
Utilizando os valores medidos da separação em função da pressão de alimentação e da tração nos tirantes, pode-se traçar as curvas da separação em função da tração, como no gráfico 8.3. Este gráfico mostra as curvas da separação em função da tração para três valores da pressão de alimentação. A inclinação destas curvas pode ser definida como a rigidez do filme de lubrificante.

Calculando um valor médio para a inclinação da curva correspondente a  $3 \text{ Kgf/cm}^2$ , encontramos para a rigidez do filme:  $k_\ell = 167 \text{ Kgf/mm}$ .

Comparando este valor com os valores encontrados para a rigidez do mancal, vemos que a rigidez do filme varia de 23 vezes a 67 vezes a rigidez do mancal.



GRÁFICO 8.3 - SEPARAÇÃO EM FUNÇÃO  
DA TRAÇÃO



Isso nos leva a concluir que o comportamento do mancal será praticamente determinado pela rigidez global do mancal, que é bastante baixa, tendo a rigidez do filme pouca influência neste comportamento, pelo menos no que diz respeito a problemas de vibração e estabilidade.

## CAPÍTULO IX

## CONCLUSÕES

Foi construído um mancal de folha semelhante ao estudado por Licht <sup>4</sup>, de três gomos, utilizando folha de bronze fosforoso de 0,15 mm de espessura, que pode ser encontrado com facilidade no mercado, e com injeção de ar feita através das folhas. Foi desenvolvida uma técnica para fabricação e o mancal assim concebido mostrou-se de fácil execução podendo ser construído sem maiores dificuldades.

Os testes de funcionamento mostraram que o mancal funciona bem em regime pressurizado, como suporte radial de um eixo vertical apoiado em um mancal de escora. O eixo pode ser acelerado até uma velocidade bem acima das faixas de instabilidade. Entre 2000 e 16200 rpm o funcionamento é estável. Foi obtida separação total entre as folhas e o eixo a partir de 9300 rpm.

Medidas de separação entre as folhas e o munhão com o rotor parado apresentaram curvas da separação em função da pressão de alimentação uniformes a partir de 1Kgf/cm<sup>2</sup> para vários valores da tração nos tirantes. A partir de 0,75 Kgf/cm<sup>2</sup> é obtida a separação para uma tração nos tirantes de até 4,5 Kgf. Para uma pressão de alimentação de 3 Kgf/cm<sup>2</sup>, a separação se mantém entre 40 e 55  $\mu$ m para a tração nos tirantes variando entre 2 e 4,5 Kgf.

Um cálculo teórico simples, baseado na teoria convencional para mancais rígidos permite estabelecer uma estimativa dos parâmetros deste mancal em primeira aproximação. As curvas da

separação em função da tração nos tirantes e da pressão de ali mentação aproximam-se das curvas experimentais a partir de uma pressão de  $1,5 \text{ Kgf/cm}^2$ .

A rigidez do filme de lubrificante situa-se na faixa de  $170 \text{ Kgf/mm}$ , enquanto a rigidez do mancal varia entre  $2,5$  e  $7,3 \text{ Kgf/mm}$ . Comparando-se a rigidez do filme e a rigidez global do mancal, vemos que esta última é a principal responsável pelo com portamento do mancal, sendo entre 23 e 67 vezes menor que a rigi dez do filme de lubrificante.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 POWEL, J.W. - Design of Aerostatic Bearings, The Machinery Publishing Co. Ltd., 1970
- 2 LICHT, L., BRANGER, M. - Motion of a Small High-Speed Rotor in 3 Types of Foil Bearings, Journal of Lubrication Technology, Abril 1975, pag. 270-282
- 3 BLOK, H., VAN ROSSUM, J.J. - The Foil Bearing - A New Departure in Hydrodynamic Lubrication - Lubrication Engineering, Vol. 9, N° 6, Dez 1953, pag. 316-320
- 4 LICHT, L., - An Experimental Study of High-Speed Rotors Supported by Air-Lubricated Foil Bearings Journal of Lubrication Technology, Trans. ASME, Series F, Vol. 91, n°3, July 1969, pg. 447-505
- 5 WALOWIT, J.A., ANNO, J.N. - Modern Developments in Lubrication Mechanics, Applied Science Publishers, Ltd, London, 1975
- 6 STAHLER, A.F., HUCKABAY, A - Analyzation, Design, Fabrication, and Testing of a Foil Bearing Rotor Support System, Ampex Corporation Report No. RR68-21, Contract N° NASW-1221, June 1966

- 7 LICHT, L., ESHEL, A. - Study, Fabrication , and Testing of a  
Foil Bearing Rotor Support System - Ampex Corpo-  
 ration report nº RR68-2, Contract NºNASW - 1456,  
 abril, 1968
  
- 8 LICHT, L. - An Experimental Study of High-Speed Rotors Suppor-  
ted by Air Lubricated Foil Bearings - Journal of  
 Lubrication Technology, Trans. ASME, Series F, Vol.  
 92, Nº 4, Oct. 1970, pp 630-660, and Vol. 94 Nº 3  
 July 1972
  
- 9 Metal Handbook, vol. 3, Machining, American Society for  
 Metals, 1967, pg. 299
  
- 10 GONÇALVES, S.E. - Transdutor Foto-Elétrico para Deslocamento,  
 relatório 1/78, Programa de Engenharia Mecânica,  
 COPPE, UFRJ, 1978
  
- 11 BAUMEISTER, H.K. - Nominal Clearance of the Foil Bearings, IBM  
 Journal of Research and Development, vol. 7, 1963,  
 pp 153-154
  
- 12 WILDMAN, M., WRIGHT, A. - The Effect of External Pressurization  
of Self-Acting Foil Bearings - Journal of Basic  
 Engineering, trans ASME, vol. 87, Series D, Nº3 ,  
 Sept. 1965, pp 631-640
  
- 13 BARLOW, E.J. - Externally Pressurized Foil Bearings, Journal  
 of Basic Engineering, trans. ASME, . Vol. 87 ,  
 Series D, Nº4, Dec. 1965, pp 986-990

- 14 LICHT, L., - An Experimental Study of Elastohydrodynamic Lubrication of Foil Bearings - Journal Lubrication Technology, trans ASME, Vol. 90, Series F, N° 1, Jan. 1968, pp 199-220
- 15 CONSTANTINESCU, V.N. - Gas Lubrication, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1969